

ارزیابی اثر عملیات ذوب مجدد روی اندازه، شکل و توزیع تخلخل‌ها در پوشش‌های NiCrBSi اعمال‌شده به روش پاشش شعله‌ای

محمد رضا کریمی، حمیدرضا سلیمی جزی و محمدعلی گل‌عذار

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۹۳/۰۶/۲۶ - پذیرش مقاله: ۹۳/۰۸/۱۷)

چکیده

تخلخل یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ریزساختاری در پوشش‌های پاشش‌حرارتی به شمار می‌رود، و به وسیله روش‌های مختلفی مطالعه می‌شود. روش آنالیز تصویری یکی از متداول‌ترین روش‌های تعیین تخلخل در پوشش به دلیل سادگی، در دسترس بودن و قابلیت اندازه‌گیری تخلخل‌های باز و بسته، تعیین خصوصیات حفره از قبیل اندازه، شکل، جهت‌گیری و توزیع سه‌بعدی آن‌ها است. در این تحقیق از روش آنالیز تصویری برای تعیین میزان تخلخل و مشخصه‌یابی حفره‌ها در پوشش NiCrBSi اعمال‌شده به روش پاشش شعله‌ای استفاده شده است. معمولاً این نوع پوشش بعد از فرآیند پاشش به منظور بهبود خواص تریبولوژیکی تحت عملیات ذوب مجدد قرار می‌گیرد. در این تحقیق عملیات ذوب مجدد در دماهای ۹۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. اثر ذوب مجدد و دمای آن روی توزیع اندازه و شکل تخلخل‌ها توسط تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی بررسی شد. نتایج نشان داد که ذوب مجدد باعث کاهش قابل توجه تخلخل پوشش (از ۱۲ به ۲ درصد) و بهبود پیوند متالورژیکی بین پوشش و زیرلایه شد. شکل حفره‌ها در اثر ذوب مجدد از اندازه درشت با شکل‌های بی‌قاعده به اندازه‌های ریزتر با شکل تقریباً کروی تبدیل شد.

واژه‌های کلیدی: پوشش NiCrBSi، پاشش شعله‌ای، ذوب مجدد، تخلخل.

Evaluation the effect of remelting temperature on size, shape and distribution of porosity of NiCrBSi coating deposited with flame spray technique

M. R. Karimi, H. R. Salimi Jazi and M. A. Golozar

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

(Received 17 September 2014, accepted 8 November 2014)

Abstract

Porosity is one of the most important microstructural features in thermal spray coatings and has been widely studied and measured by various techniques. Image analysis technique is one of the popular techniques in determining porosity in coatings because of simplicity, accessibility, and ability to measure both open and closed porosities as well as pore characteristics such as size, shape, orientation, and spatial distribution. In the current study, image analysis technique has been used to examine the porosity level and characteristics of pore size and shapes within NiCrBSi coatings applied by flame spray technique. These coatings are usually remelting after thermal spraying to improve their tribological properties. Remelting process was done at 950, 1000, 1050 and 1100 °C. The effect of remelting temperature on the shape and size distribution of coating porosities was investigated by SEM pictures. Results obtained revealed that remelting decreased the porosity level and improved the metallurgical bonding between substrate coating. The irregular and sharp disk-shaped pore turned into a non-flat spheroidal and nearly spherical shape because of the remelting process.

Keywords: NiCrBSi coating, Flame spray and remelting, porosity.

Email of corresponding author: mrkarimi88@gmail.com

مقدمه

مذاب پرتاب‌شده به سطح در پر کردن بی‌قاعدگی‌های لایه سطحی تشکیل‌شده از قبل، است. این برآمدگی‌ها می‌تواند ناشی از ذرات ذوب نشده، تکه شده، فشرده و منقبض‌شده و یا ساختار سطح زیرلایه باشد. اغلب فشار درون ذرات مذاب پرتاب‌شده به سطح برای شکستن تنش سطحی آن کافی نیست؛ بنابراین این ذرات نمی‌توانند درون حفره‌ها کوچک نفوذ کنند. این پدیده به فاکتورهایی از قبیل توزیع فشار درون ذرات مذاب، توپوگرافی زیرلایه و همچنین سرعت انجماد بستگی دارد. حفره‌ها تشکیل‌شده از این نوع بیشتر شکل بی‌قاعده دارند، درحالی‌که حفره‌ها تشکیل‌شده در اثر محبوس شدن گاز عموماً کروی و کوچکتر است [۸].

به تازگی روش‌های متعددی جهت ارزیابی میزان تخلخل در پوشش‌های پاشش حرارتی از جمله تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه (MIP)^۱، جذب گاز BET^۲، جابه‌جایی ارشمیدسی^۳، پراکنش نوترون با زاویه کم (SANS)^۴ و آنالیز تصویر استفاده می‌شود. روش‌های MIP و BET تخلخل را از طریق پر کردن ماده با گاز یا مایع (جیوه) و به دست آوردن حجم حفره‌ها از وزن سیال جذب‌شده، محاسبه می‌کنند. در این دو روش نیاز است که چگالی سیال جاذب از طریق حفره‌ها را مقداری ثابت در نظر گرفت. در مواد دارای حفره‌ها بسیار ریز که نسبت مساحت سطح به حجم آن‌ها بسیار زیاد است، از تأثیر جداره حفره‌ها روی فشرده‌سازی مولکول‌های گاز یا مایع نمی‌توان چشم‌پوشی کرد؛ در نتیجه این امر خطاهای سیستماتیکی را در تعیین تخلخل ایجاد می‌کند. علاوه بر این، این دو روش توانایی اندازه‌گیری حفره‌ها باز را ندارند. در روش جابه‌جایی ارشمیدسی تخلخل از طریق اختلاف وزن‌های اندازه‌گیری شده، محاسبه می‌شود. دقت پایین در اندازه‌گیری وزن از دست داده شده و دشواری آن برای

پوشش‌های خودگداز NiCrBSi معمولاً برای کاربردهای مقاوم به خوردگی و سایش قطعات و اجزایی که در دمای بالا کار می‌کنند، استفاده می‌شود. این نوع پوشش‌ها اغلب به روش پاشش شعله‌ای که حساس به تشکیل تخلخل است، اعمال می‌شود. این موضوع به دلیل ذوب ناقص ذرات پاشش‌شده و یا انبساط گازهای تولیدشده حین عملیات پاشش است. حفره‌ها بی‌قاعده و کشیده شده، مراکز تمرکز تنش و حساس به ترک ترد هستند. این مسئله مدت زمان عملکرد پوشش را تحت شرایط شدید تنش، خوردگی، فرسایش و خستگی کاهش می‌دهد. ذوب مجدد جزئی پوشش‌های خودگداز NiCrBSi بعد از اتمام عملیات پوشش‌دهی یک روش مؤثر در کاهش تخلخل و بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی پوشش است. هنگام فرآیند ذوب مجدد، پدیده‌های متالورژیکی و شیمیایی درون پوشش NiCrBSi منجر به واکنش‌های احیا و خروج گاز از پوشش می‌شوند که این موضوع باعث بهبود ریزساختار، ریزسختی، چسبندگی و خواص خوردگی آن می‌شود [۱-۳].

تخلخل یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های پوشش‌های پاشش حرارتی است که مطالعات زیادی در خصوص آن انجام شده است. تخلخل به حفره‌ها درون جسم ماده که عموماً هنگام فرآیندها تشکیل می‌شود، اطلاق شده و اغلب مقدار این کمیت به صورت کسر یا درصد گزارش می‌شود. به‌طور مشخص تخلخل روی خواص فیزیکی [۴]، مکانیکی، مغناطیسی، الکتریکی و هدایت حرارتی مواد [۵-۷] تأثیرگذار است.

تخلخل در پوشش‌های پاشش حرارتی انواع گوناگونی دارد که بر اساس مکانیزم تشکیل آن‌ها طبقه‌بندی شده‌اند. جدول ۱ انواع تخلخل‌ها در پوشش‌های پاشش حرارتی را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد. صرف‌نظر از مکانیزم تشکیل، اکثر حفره‌ها به علت عدم توانایی ذرات مذاب یا نیمه

¹ Mercury Mntrusion Porosimetry

² Brunauer-Emmett-Teller gas adsorption

³ Archimedean Displacement

⁴ Small-Angle Neutron Scattering

می‌شود. البته روش مناسب اندازه‌گیری باید با در نظر گرفتن مزایا و محدودیت‌های هر روش انتخاب شود [۴ و ۸]. در تحقیق حاضر تخلخل پوشش‌ها با استفاده از روش آنالیز تصویر محاسبه شد. میزان تخلخل و مشخصه‌یابی آن از قبیل توزیع شکل و اندازه درون پوشش‌های پاشش حرارتی بررسی شده است. حفره‌ها برحسب مشخصاتی که دارند طبقه‌بندی شده و کسر هر نوع از آن‌ها در پوشش‌ها پیش‌بینی شده است. اهمیت این مشخصات برحسب پوشش‌ها این است که امکان پیش‌بینی منشأ حفره را می‌دهد، بنابراین شکل و اندازه حفره‌ها درون پوشش را می‌توان با تنظیم پارامترهای پوشش‌دهی برای حداکثر کردن نوع مطلوب حفره‌ها بهینه کرد.

مواد و روش‌ها

پوشش‌دهی

از ورق فولاد ساده کربنی St37-2 با ضخامت ۳ میلی‌متر به‌عنوان زیرلایه و از پودر تجاری NiCrBSi ساخت شرکت GTV آلمان با کد 10.15.6 که دارای شکل کروی، اندازه پودر ۴۵ تا ۱۲۵ میکرومتر و سختی حدود ۶۰HRC بود که برای پوشش‌دهی استفاده شد.

تخمین چگالی ماتریس وقتی که استحاله آلوتروپی رخ می‌دهد، از محدودیت‌های این روش به شمار می‌آید. از روش SANS می‌توان تخلخل را به‌وسیله اطلاعات مساحت سطح ویژه حفره‌ها در پوشش‌های سرامیکی محاسبه نمود. اگرچه ارتباط بین مساحت سطح ویژه حفره‌ها و خواص مکانیکی پوشش ارتباط ضعیفی است. علاوه بر این میانگین حجمی اطلاعات در مدل با پایه-SANS محدودیت‌هایی را با ریزساختار واقعی دارد [۴ و ۸]. تخلخل یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ریزساختاری در پوشش‌های پاشش حرارتی به شمار می‌رود، و به‌وسیله روش‌های مختلفی مطالعه می‌شود. روش آنالیز تصویری یکی از متداول‌ترین روش‌های تعیین تخلخل در پوشش به دلیل سادگی، در دسترس بودن و قابلیت اندازه‌گیری تخلخل‌های باز و بسته، یعنی خصوصیات حفره از قبیل اندازه، شکل، جهت‌گیری و توزیع سه‌بعدی آن‌ها است. در میان تمامی روش‌های ذکرشده، روش آنالیز تصویر به‌طور گسترده‌تری به دلیل قابلیت انجام مجدد، اقتصادی‌تر بودن، سادگی و گوناگونی آنالیز برای تعیین و مشخصه‌یابی تخلخل پوشش از جمله تخلخل‌های باز و بسته، توزیع اندازه حفره و توزیع سه‌بعدی استفاده

جدول ۱. مکانیزم تشکیل انواع حفره‌ها در پوشش‌های پاشش حرارتی [۹].

مکانیزم تشکیل	نوع	
انباشته شدن ذرات. مقدار و اندازه مستقیماً به اندازه ذره و توزیع آن در منبع تغذیه پودر بستگی دارد.	بین‌لایه‌ای	۱
تلاطم جریان گاز.	بسته‌های محبوس شده گاز	۲
انحلال گاز درون فلز مذاب و سپس تبخیر آن هنگام انجماد فلز.	حباب‌های گاز	۳
خردشدگی ذرات پاشش شده در اثر برخورد با سطح.	بین ذرات تکه‌تکه شده	۴
انقباض ذرات تبخیر شده‌ی جزئی؛ اغلب دارای پسماند پودری مانند.	بین ذرات منقبض شده	۵
انقباض ناشی از انجماد ذرات در ساختار پوشش.	بین ذرات‌ها	۶
گوناگون (انجماد، سرعت سرد شدن، نیروهای خارجی و ...).	ریزترک‌ها	۷

به‌طور یکنواخت حرکت داده تا تمامی منطقه موردنظر در آن دما قرار گیرد. دلیل انتخاب دماهای گفته شده این است که دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد زیر دمای ذوب پودر و دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد زیرخط مذاب آلیاژ NiCrBSi درست جایی که فاز جامد از سیلان فاز مایع از سطح جلوگیری می‌کند، است.

ارزیابی تخلخل پوشش‌ها

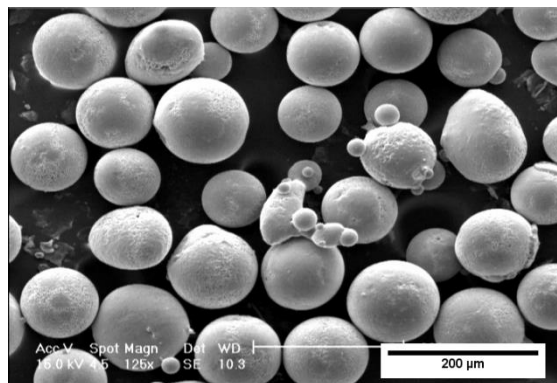
جهت بررسی تخلخل پوشش‌های ایجادشده، نمونه‌هایی توسط برش وایرکات از نواحی اطراف ترموکوپل‌ها تهیه شد. آماده‌سازی نمونه‌ها مطابق با استاندارد STM E1920 و طی مراحل سناده‌زنی به ترتیب از سناده ۸۰، ۳۲۰، ۶۰۰، ۱۲۰۰، ۲۴۰۰ و ۴۰۰۰ و سپس پولیش با پودر آلومینا انجام شد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل SEM Philips XL30 جهت تصویرگیری از سطح مقطع نمونه‌ها با آشکارگر الکترون برگشتی در بزرگنمایی ۸۰ برابر استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی به دلیل کیفیت بالاتر، نتایج واقعی‌تری نسبت به تصاویر گرفته شده از میکروسکوپ نوری می‌دهد؛ بنابراین برای محاسبه تخلخل از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبش از ۱۰ منطقه راندوم که اشتراکی با هم ندارند، استفاده شد. تمامی تصاویر تحت شرایط یکسان از قبیل فاصله کاری، رزولوشن، بزرگنمایی، روشنایی، کنتراست و ولتاژ شتاب‌دهنده گرفته شد.

میزان تخلخل پوشش‌ها با ارزیابی این تصاویر به‌وسیله نرم‌افزار آنالیز تصویر ImageJ 1.40g مطابق با استاندارد ASTM E2109 روش B تعیین شد. درصد تخلخل با اندازه‌گیری حفره‌ها سطحی در یک محدوده ۱۱۵۰×۵۰۰ میکرومتر مربع برای تمامی نمونه‌ها انجام شد. درصد سطحی تخلخل برابر درصد سطحی پیکسل‌های سیاه‌رنگ در تصویر باینری است. برای هر نمونه از ۱۰ جای مختلف این اندازه‌گیری‌ها تکرار شد و میانگین به‌عنوان درصد تخلخل گزارش شد.

ترکیب شیمیایی و تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پودر NiCrBSi به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۲. ترکیب شیمیایی پودر NiCrBSi مورد استفاده.

Ni	C	Fe	Si	B	Cr	(wt. %)	ترکیب شیمیایی
Bal	۰/۷۵	۴/۵	۴/۵	۳/۳	۱۴		NiCrBSi پودر



شکل ۱. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پودر NiCrBSi مورد استفاده.

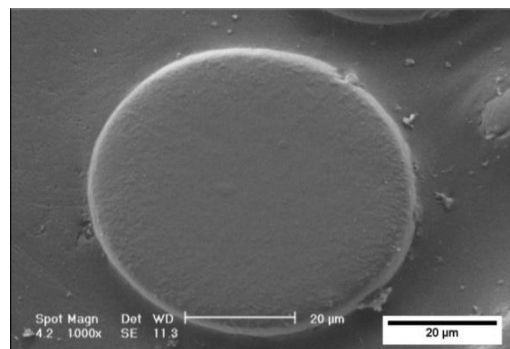
تمیز کردن سطح زیرلایه به‌منظور جدا کردن چربی‌ها و آلودگی‌ها توسط دستگاه ترانسونیک به مدت ۱۵ دقیقه انجام شد. سپس به‌منظور افزایش چسبندگی پوشش به زیرلایه، سطح زیرلایه توسط ذرات سخت SiC ماسه‌پاشی شد. پیشگرم زیرلایه به‌وسیله شعله اکسی استیلن تا رسیدن به دمای ۱۰۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. از دستگاه پاشش شعله‌ای مدل UNI-SPRAY JET ساخت شرکت GTV آلمان با فاصله پاشش ۲۰ سانتی‌متر، فشار اکسی استیلن و اکسیژن به ترتیب ۰/۷ و ۲/۵ بار برای پوشش‌دهی استفاده شد. نحوه حرکت تفنگ به صورت رفت و برگشتی است.

عملیات ذوب مجدد بلافاصله پس از اتمام فرآیند پوشش‌دهی با استفاده از شعله اکسی استیلن در چهار دمای ۹۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. دماهای گفته‌شده با تعبیه ترموکوپل‌هایی در زیرلایه کنترل شد. به این منظور شعله اکسی استیلن روی سطح پوشش قرار گرفته و به‌محض رسیدن به دمای موردنظر

نتایج و بحث

ریزساختار پوشش

شکل ۲ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع پودر NiCrBSi را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که هیچ‌گونه حفره‌ای در سطح مقطع پودر وجود ندارد. یک احتمال ایجاد تخلخل در پوشش‌های پاشش حرارتی به دلیل حضور گازهای محبوس شده در پودر اولیه است. اگرچه این حالت در تحقیق حاضر صدق نمی‌کند؛ سطح مقطع پودر اولیه NiCrBSi یک ساختار متراکم و عاری از تخلخل را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر شرایط و پارامترهای پوشش‌دهی منجر به ایجاد تخلخل در پوشش‌ها می‌شود.



شکل ۲. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع پودر

NiCrBSi

شکل ۳ تصویر سطح مقطع پوشش پاشش شده را نشان می‌دهد. در شکل ۳ ذرات ذوب نشده، حفره‌ها بزرگ و مرز بین اسپلت‌ها مشاهده می‌شود که از خصوصیات پوشش‌های پاشش حرارتی به شمار می‌رود. همچنین این پوشش به صورت مکانیکی با زیرلایه پیوند دارد. انواع حفره‌ها مشاهده شده در شکل ۳ را می‌توان با انواع مکانیزم تشکیل حفره‌ها ذکر شده در جدول ۱ مطابقت داد. اگرچه در پوشش پاشش شده حفره‌ها ناشی از ریزترک‌ها و بین دندریت‌ها مشاهده نشد. هر نوع حفره متأثر از مکانیزم مختلفی تشکیل شده است. اندازه و شکل حفره‌ها را می‌توان به منظور پیش‌بینی منشأ و طبقه‌بندی آن‌ها بر

اساس مکانیزم تشکیلشان تفسیر نمود که در بخش بعدی به آن پرداخته می‌شود.

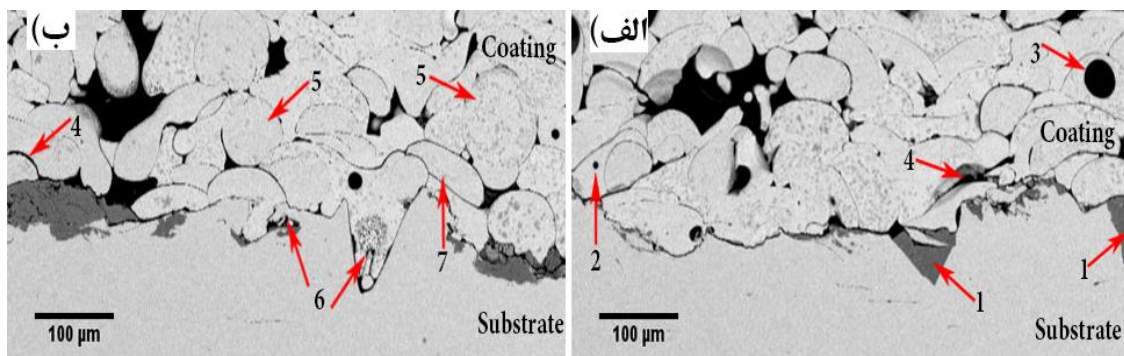
ناپیوستگی‌های پوشش به علت تخلخل، حضور ذرات ذوب نشده و مرزهای بین لایه‌ای درون پوشش ایجاد می‌شود. تقریباً دستیابی به پوششی عاری از عیب در فرآیندهای پاشش حرارتی غیرممکن است که همین عیوب باعث کاهش مقاومت به سایش و خوردگی می‌شود [۳]. به طور کلی وجود تخلخل در لایه‌های پوششی تأثیر مخربی روی عملکرد آن‌ها دارد، مگر اینکه کاربرد پوشش در یاتاقان‌ها باشد [۱۰].

شکل ۴ تصویر سطح مقطع نمونه‌های پاشش و ذوب مجدد شده در دماهای ۹۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. پس از عملیات ذوب مجدد مشاهده می‌شود که مرزهای اولیه بین ذرات از طریق خاصیت خودگدازی آلیاژ NiCrBSi محو شده، تخلخل پوشش‌ها بعد از عملیات ذوب مجدد کاهش یافته و پیوند متالورژیکی مناسبی بین پوشش و زیرلایه برقرار شده است.

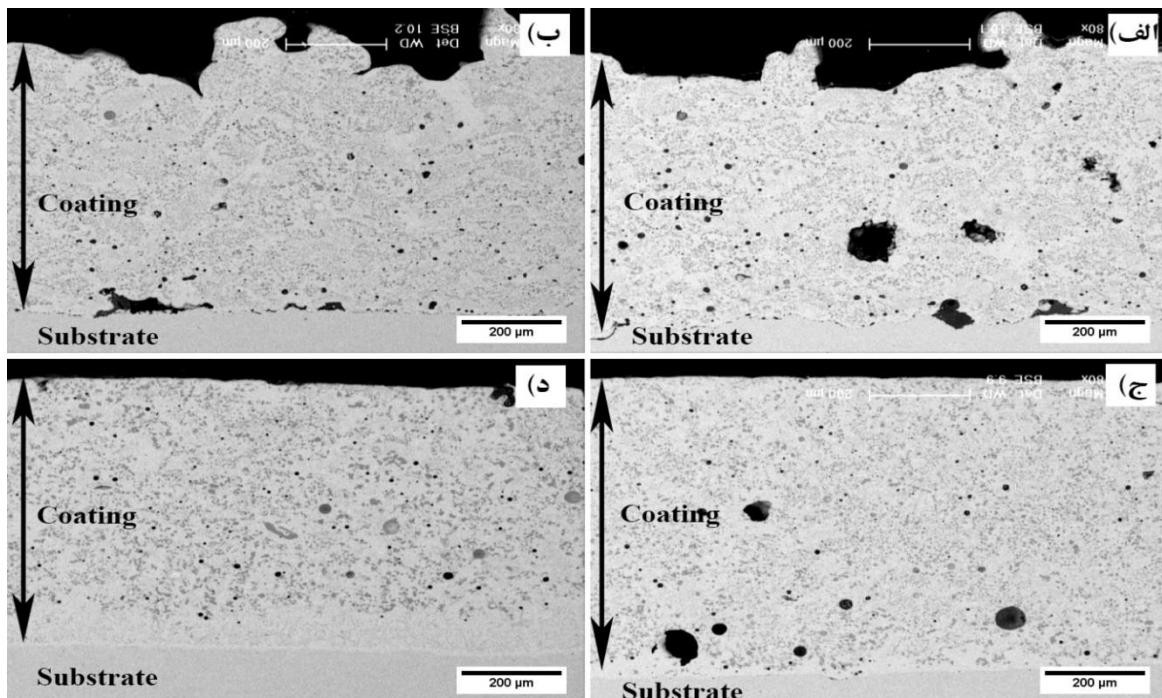
به عبارت دیگر حضور عنصر B در ساختار پودر اولیه، آلیاژ NiCrBSi را به سمت تشکیل ترکیب یوتکتیک Ni-Ni₃B میل می‌دهد و این کار با کاهش دمای ذوب آن همراه است. همچنین اضافه نمودن Si به Ni و ثابت نگه‌داشتن B منجر به کاهش دمای لیکوئیدوس آلیاژ می‌شود. در ضمن Si خودگدازی آلیاژ را بالا می‌برد. در نتیجه حضور دو عنصر B و Si در این آلیاژ باعث زودذوبی و خودگدازی آن شده و طی عملیات ذوب مجدد حفره‌ها موجود در ساختار پوشش را پر کرده و به بهبود پیوند بین ذرات پوشش کمک می‌کند. علاوه بر این حین ذوب مجدد، ذرات پوشش به صورت جزئی ذوب شده بنحوی که اکسیدهای تشکیل شده در حین پاشش می‌تواند توسط خاصیت خودگدازی عناصر B و Si جدا شوند [۲، ۱۱ و ۱۲].

در نظر داشت که در صورت انجام ذوب مجدد بیش از حد امکان آن وجود دارد که گازها در نزدیکی فصل مشترک پوشش و زیرلایه محبوس شده و با پیوستن به یکدیگر تشکیل حفره‌ها را می‌دهد. این حفره‌ها مسافت زیادی تا سطح پوشش برای خروج داشته و حین انجماد در هوا درون پوشش محبوس می‌مانند و باعث کاهش کمتر تخلخل پوشش می‌شود [۱۳].

دمای بهینه ذوب مجدد دمایی است که تخلخل پایین و سختی پوشش بالا و در آن حالت پیوند متالورژیکی بین پوشش و زیرلایه قابل مشاهده باشد. پوشش‌هایی که میزان ذوب مجدد کافی نداشته‌اند دارای حفره‌ها بین ذره‌ای باز، پیوستگی نامناسب و پیوند مکانیکی با زیرلایه هستند (شکل ۴-ب و ج). پوشش‌هایی که میزان ذوب مجدد آن‌ها به اندازه کافی باشد دارای پیوند متالورژیکی و پیوستگی مناسبی بین پوشش و زیرلایه هستند. اگرچه باید



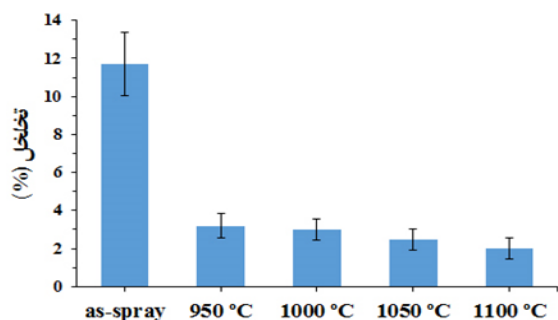
شکل ۳. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح مقطع پوشش پاشش شده؛ (۱) ذرات سنگ باقیمانده، (۲) حباب‌ها گاز، (۳) بسته‌های محبوس شده گاز، (۴) مرز بین لایه‌ها (اسپلت‌ها)، (۵) ذره ذوب نشده، (۶) ذرات تکه‌تکه و منقبض شده.



شکل ۴. سطح مقطع نمونه‌های پاشش و ذوب مجدد شده در دمای الف) ۹۵۰، ب) ۱۰۰۰، ج) ۱۰۵۰ و د) ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد.

فازیابی پوشش

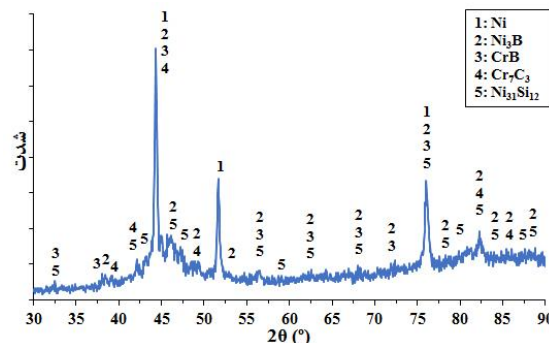
بنابراین تخلخل پوشش در این حالت حدود ۱۲ درصد است. همچنین سطح اکسید در پوشش پاشش شعله‌ای به خاطر مدت زمان قرارگیری بیشتر در معرض شعله^۱، بالاتر بوده و در نتیجه ذرات تا درجه حرارت بالاتری گرم شوند؛ که این امر مطلوب واکنش شیمیایی با حضور اکسیژن در جهت پاشش است. سرعت پایین و زمان انتقال طولانی‌تر درون شعله دمای ذرات را افزایش داده و ممکن است این موضوع توضیح مناسبی برای توجیه سطح بالای اکسید در پوشش پاشش شعله‌ای به شمار آید [۱۴].



شکل ۶. درصد تخلخل نمونه‌های پاشش شده و پاشش و ذوب مجدد شده در دماهای ۹۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد.

درصد تخلخل و شکل حفره‌ها می‌تواند به وسیله ذوب مجدد جزئی آلیاژ NiCrBSi کنترل شود. در اثر ذوب مجدد درصد تخلخل پوشش در حدود ۸۳ درصد کاهش داشته است. حداقل تخلخل در نمونه ذوب مجدد شده در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. درصد تخلخل از مقدار اولیه ۱۱/۷ به ۲/۰ درصد بعد از عملیات ذوب مجدد کاهش یافت. دمای ذوب مجدد به‌عنوان پارامتر مؤثر در کاهش تخلخل محسوب می‌شود. نکته مهم دیگر این است که تخلخل به‌طور کامل قابل حذف شدن نیست؛ اگرچه عملیات ذوب مجدد به‌طور قابل توجهی تخلخل اولیه را کاهش و چگالی پوشش را افزایش داده است [۱۵].

شکل ۵ الگوی پراش پرتوایکس پوشش پاشش شده را نشان می‌دهد. در آنالیز پراش پرتوایکس مقدار قابل‌ملاحظه‌ای از فازهای محتمل که از پیچیدگی آلیاژ NiCrBSi نشأت می‌گیرد از قبیل فازهای Ni₃B، Ni، CrB، Cr₇C₃ و Ni₃₁Si₁₂ برای این پوشش تعیین شد. با توجه به درصد بالای Ni در ترکیب اولیه پودر، پوشش اساساً از Ni به‌عنوان فاز اصلی تشکیل شده است. برای آلیاژهای معمول خودگداز (از قبیل آلیاژ (NiCrBSi)، زمینه پوشش پاشش شده از فاز محلول جامد غنی از γ-Ni و یوتکتیک با نقطه ذوب پایین Ni-Ni₃B تشکیل شده است. همچنین پراکندگی از کاربیدهای سخت کروم (Cr₇C₃) اگر C حدود ۰/۶ wt. % و Cr₃C₂ اگر C > ۰/۸ wt. % و ذرات کاربید بور (CrB) اگر B > ۲ wt. % درون زمینه است [۱۳].

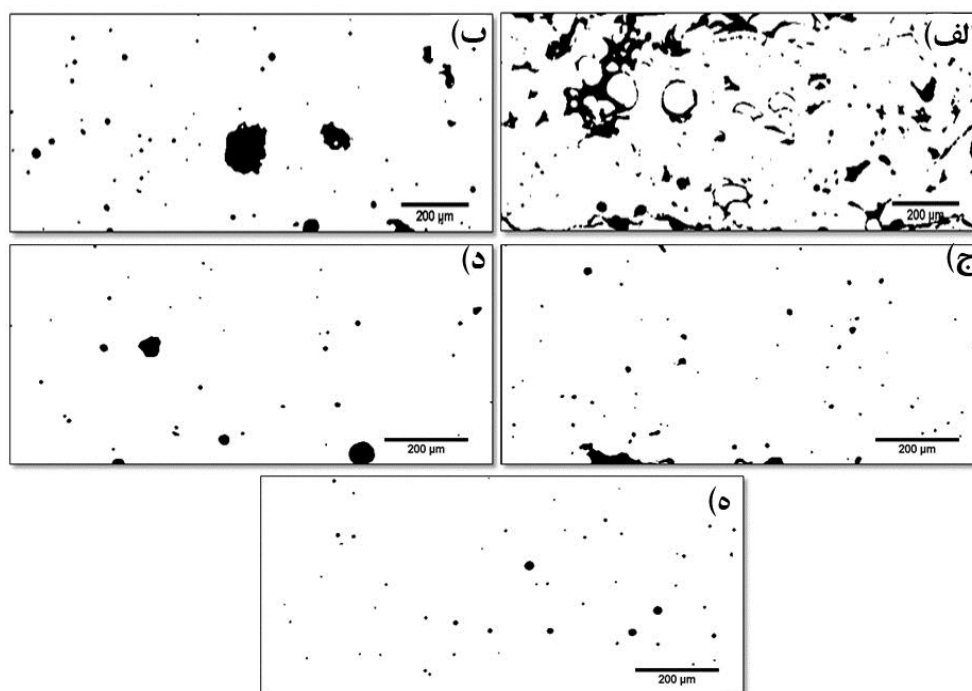


شکل ۵. الگوی پراش پرتوایکس پوشش پاشش شده.

تخلخل پوشش

شکل ۶ درصد تخلخل نمونه‌های پوشش پاشش شده و ذوب مجدد شده در ۹۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. نوار خطا در شکل ۶ نشان‌دهنده انحراف معیار برای تخلخل اندازه‌گیری شده در هر نمونه است. در حالت پاشش شده به دلیل سرعت کم ذرات پاشش شده در روش پاشش شعله‌ای نسبت به دیگر فرآیندهای پاشش حرارتی، بسیاری از ذرات به‌طور مناسب در هنگام برخورد با زیرلایه پهن نمی‌شوند.

¹ Dwell time



شکل ۷. نمونه‌ای از تصاویر باینری الف) پاشش شده، ذوب مجدد شده در ب) ۹۵۰، ج) ۱۰۰۰، د) ۱۰۵۰ و ه) ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد.

می‌شوند. علاوه بر این تخلخل به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد. تعداد و اندازه تخلخل‌های موجود در پوشش فاکتوری مؤثر در کنترل خواص مکانیکی آن از جمله سایش، خستگی و غیره به حساب می‌آید. در قسمت بعدی آنالیز بر روی شکل و اندازه حفره‌ها متمرکز می‌شود. حفره یک جز سه بعدی بی‌قاعده در ساختار مقطع خورده پوشش‌ها است که به صورت پراکنده در نواحی مختلف می‌گیرد. شکل حفره‌ها درون پوشش‌های پاشش حرارتی به می‌گیرد. شکل حفره‌ها درون پوشش‌های پاشش حرارتی به نوع مکانیزم تشکیل آن‌ها وابسته است. حفره‌ها معینی که در اثر بسته‌های گاز محبوس شده یا حباب‌های گاز ایجاد می‌شوند اغلب کروی هستند [۸]. اگرچه حفره‌ها به وجود آمده از طریق دیگر مکانیزم‌ها لزوماً کروی نیستند. برای اثبات این موضوع توصیف‌گرهای شکل از قبیل نسبت ابعادی^۲ و گردی^۳ حفره‌ها درون پوشش‌ها تعریف شده‌اند.

تشکیل فاز یوتکتیک مذاب در دمای ذوب مجدد، قابلیت پرکردن حفره‌ها فاز جامد زمینه با مواد مذاب تشکیل شده را می‌دهد؛ که در نهایت به کاهش تخلخل پوشش منجر می‌شود. همچنین به علت اختلاف فشار اتمسفر با فشار گازهای محبوس شده درون پوشش در حین عملیات ذوب مجدد گازها از پوشش خارج می‌شود. تعیین تخلخل برای کنترل پارامترهای پاشش شعله‌ای و عملیات حرارتی بعد آن و همچنین مناسبیت پوشش برای اهداف مورد نظر، اهمیت دارد.

شکل ۷ تصاویر دوتایی^۱ متناظر با نمونه‌های پاشش شده و ذوب مجدد شده شکل ۴ را که برای محاسبه اندازه و شکل تخلخل‌ها استفاده شده، نشان می‌دهد. نقاط سیاه‌رنگ نشانگر حفره‌ها موجود در ساختار پوشش‌ها است. شکل ۷-الف شبکه‌ای از تخلخل‌های به هم پیوسته را که در نتیجه انقباض ذرات مذاب هنگام انجماد در فرآیند پاشش شعله‌ای است، نشان می‌دهد. پس از عملیات ذوب مجدد، حفره‌ها کمتر کشیده شده و با اشکال دایره‌ای‌تر مشاهده

² Aspect Ratio

³ Circularity

¹ Binary

توزیع نسبت ابعادی نمونه پاشش شده در محدوده ۰/۴ تا ۰/۸ تغییر می‌کند؛ درحالی‌که بعد از عملیات ذوب مجدد بین ۰/۸ تا ۱ است. درصد توزیع این نسبت بین صفر تا ۰/۸ برای نمونه پاشش شده حدود ۸۵ درصد و برای نمونه‌های ذوب مجدد شده ۴۰ تا ۵۰ است. نسبت ابعادی پارامتری بااهمیت و مرتبط به کارایی و تحمل پوشش است.

نمودار گردی نمونه‌های ذوب مجدد شده همپوشانی بیشتری با یکدیگر داشته و می‌توان عنوان کرد که دمای ذوب مجدد اثر چندانی روی تغییر نسبت گردی نداشته است. در نمونه پاشش شده حدود ۴۴ درصد توزیع گردی حفره‌ها بالای ۰/۸ است؛ درحالی‌که این مقدار برای نمونه‌های ذوب مجدد شده بین ۸۳ تا ۹۰ درصد است.

امکان دارد که نسبت ابعادی تعدادی از حفره‌ها معادل ۱ باشد؛ درحالی‌که مقدار گردی کمتر از ۱ داشته باشد. این موضوع این مطلب را نشان می‌دهد که حتی اگر حفره‌ها کشیده نباشند؛ به‌عنوان مثال اگر مقدار محور اصلی و فرعی یکسانی هم داشته باشند، لزوماً گرد نیستند [۸]. این مطلب در نوع حفره‌ها این تحقیق مشاهده نشد.

جدول ۳. تعریف توصیفگرهای شکل و اندازه استفاده‌شده در مشخصه‌یابی حفرات.

توضیحات	توصیفگر
برابر با $D=(4A/\pi)^{-1}$ ، که در آن D قطر معادل دایره‌ای با حفره‌ای مشابه با مساحت A	قطر معادل
نسبت محور اصلی به محور فرعی	نسبت ابعادی
برابر $4\pi(A/p^2)$ ، که در آن A برابر مساحت و p محیط حفره	گردی
بزرگ‌ترین قطر بیضی متناسب با حفره	محور اصلی
برابر $x^2=1-(b/a)^2$ ، که در آن a و b به ترتیب محور اصلی و فرعی	فاکتور شکل

ابعادی^۱ و گردی^۲ حفره‌ها درون پوشش‌ها تعریف شده‌اند. نسبت ابعادی به نسبت محور اصلی به فرعی حفره‌ها، درحالی‌که گردی به‌وسیله رابطه $4\pi(A/p^2)$ تعریف می‌شود که در آن A برابر مساحت و p محیط حفره است. هنگامی‌که نسبت ابعادی و گردی به یک نزدیک شوند حفره به سمت کروی شدن پیش می‌رود. در ضمن هنگامی‌که حفره‌ها به سمت کشیده شدن پیش رود نسبت ابعادی افزایش و گردی کاهش می‌یابد. قطر معادل^۳ حفره عبارت است از قطر دایره‌ای با مساحت مشابه حفره که با فرمول $D=(4A/\pi)^{-1}$ محاسبه می‌شود؛ که در آن D قطر معادل و A مساحت حفره است. محور اصلی به بزرگ‌ترین قطر بیضی‌ای که بهترین تطابق را با حفره دارد، اطلاق می‌شود و محور فرعی قطر دیگر این بیضی است. توصیفگرهای شکل و اندازه در مشخصه‌یابی حفره‌ها به‌طور خلاصه در جدول ۳ آورده شده است.

شکل ۸ توزیع نرمال شده قطر معادل و محور اصلی را برای نمونه‌های پاشش شده و ذوب مجدد شده در دماهای ۹۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. هر دو توزیع دارای نموداری نامتقارن با پیکی در ناحیه چپ آن (چولگی به چپ^۴) با نسبت زیادی از قطر معادل و محور اصلی به ترتیب در محدوده ۵ تا ۱۵ و ۸ تا ۲۰ میکرومتر است. نمونه پاشش شده حفره‌ها با توزیع اندازه گسترده‌تر از خود نشان می‌دهد. بعد از انجام عملیات ذوب مجدد توزیع قطر معادل و محور اصلی باریک‌تر شده است.

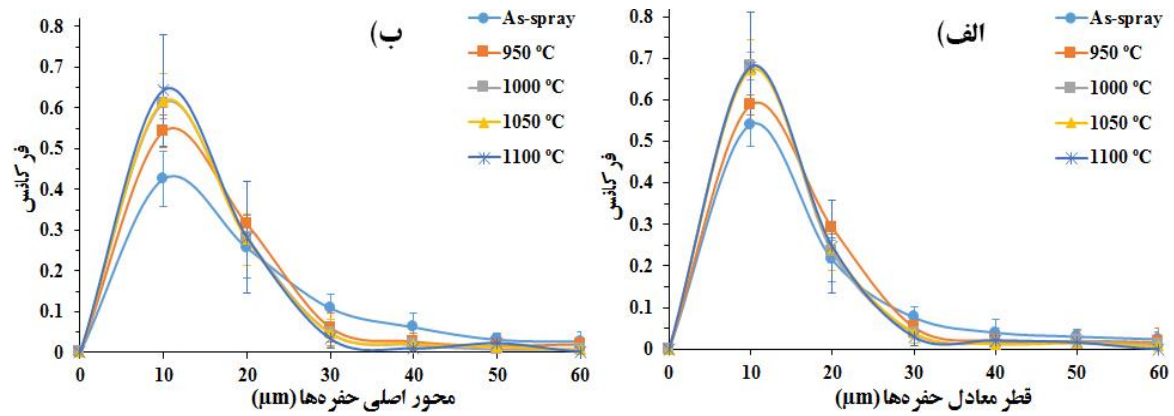
شکل ۹ توزیع نرمال شده نسبت ابعادی و گردی را برای نمونه‌های پاشش شده و ذوب مجدد شده در دماهای ۹۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.

¹ Aspect Ratio

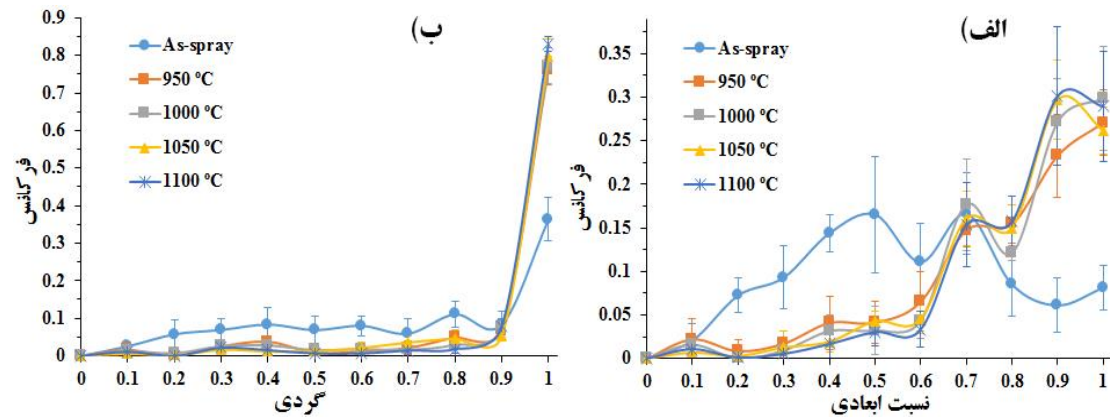
² Circularity

³ Equivalent diameter

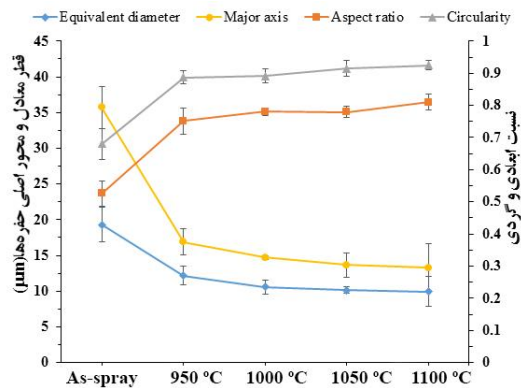
⁴ Positively skewed



شکل ۸. توزیع نرمال شده الف) قطر معادل و ب) محور اصلی نمونه‌های پوشش پاشش شده و ذوب مجدد شده در دماهای ۹۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد.



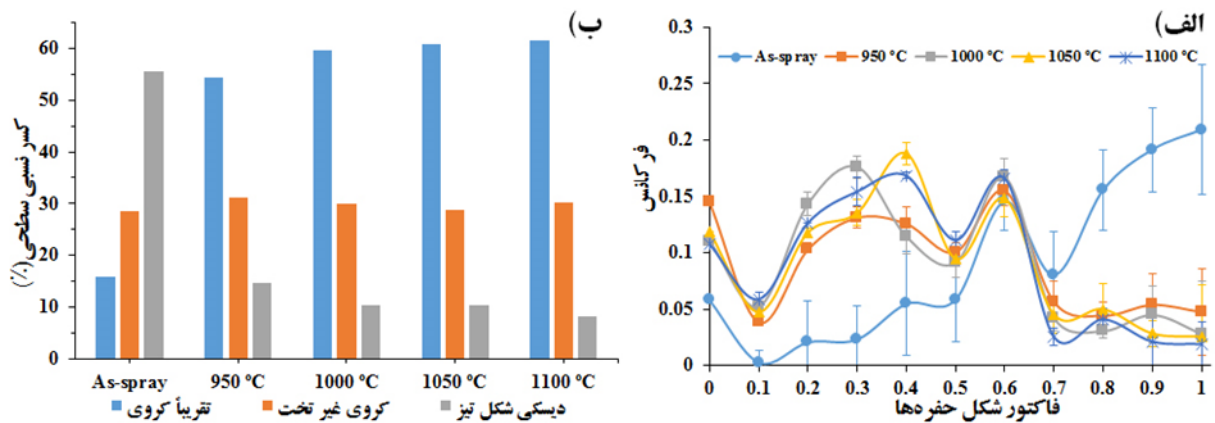
شکل ۹. توزیع نرمال شده الف) نسبت ابعادی و ب) گردی نمونه‌های پوشش پاشش شده و ذوب مجدد شده در دماهای ۹۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد.



شکل ۱۰. تغییرات قطر معادل حفره‌ها، محور اصلی، نسبت ابعادی و گردی برای نمونه‌های پاشش شده و ذوب مجدد شده در دماهای ۹۵۰-۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد.

شکل ۱۰ میانگین تغییرات قطر معادل، محور اصلی، نسبت ابعادی و گردی نمونه‌های پاشش شده و ذوب مجدد در دماهای ۹۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد را در یک نمودار نشان می‌دهد.

ذوب مجدد باعث کاهش قطر معادل و محور اصلی حفره‌ها و افزایش نسبت ابعادی و گردی می‌شود. این کاهش و افزایش مقادیر ذکر شده با دمای عملیات ذوب مجدد رابطه مستقیم دارد. علاوه بر این اختلاف بین این مقادیر برای نمونه پاشش شده و ذوب مجدد محسوس است؛ درحالی‌که بین نمونه‌های ذوب مجدد این روند کاهش یا افزایش کند می‌شود.



شکل ۱۱. توزیع حفره‌ها کروی، کروی غیر تخت و دیسکی شکل تیز به‌عنوان تابعی از دمای ذوب مجدد، الف) نمودار توزیع نرمال شده و ب) نمودار کسر نسبی سطحی.

برای بررسی اثر ذوب مجدد روی توزیع اندازه و شکل حفره‌ها استفاده شد که نتایج زیر به دست آمد:

۱- در تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع پودر NiCrBSi هیچ‌گونه حفره‌ای وجود نداشت که نشانگر یک ساختار متراکم و عاری از تخلخل است و احتمال ایجاد تخلخل را به دلیل حضور گازهای محبوس شده در پودر اولیه رد می‌کند.

۲- در پوشش پاشش شده ذرات ذوب نشده، حفره‌ها بزرگ و مرز بین اسپلت‌ها که از خصوصیات پوشش‌های پاشش حرارتی است، مشاهده می‌شود. در این حالت پوشش با پیوندی مکانیکی به زیرلایه متصل است. پس از عملیات ذوب مجدد مرزهای اولیه بین ذرات از بین رفته، تخلخل به صورت قابل‌توجهی کاهش یافته و پیوند متالورژیکی مناسبی بین پوشش و زیرلایه برقرار شده است.

۳- در حالت پاشش شده تخلخل حدود ۱۲ درصدی برای پوشش به دست آمد. ذوب مجدد باعث کاهش بیش از ۸۳ درصدی تخلخل شده و این کاهش با دمای ذوب مجدد رابطه مستقیم دارد. کمترین میزان تخلخل برای نمونه ذوب مجدد شده در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۲/۰ درصد است.

شکل حفره‌ها را می‌توان با توجه به فاکتور شکل (X^2) به سه قسمت طبقه‌بندی کرد: حفره‌ها تقریباً کروی^۱ ($0/1 < X^2 < 0/5$)، حفره‌ها کروی غیر تخت^۲ ($0/5 < X^2 < 0/8$)، حفره‌ها دیسک شکل تیز^۳ ($0/8 < X^2 < 1$) [۱۶].

شکل ۱۱ توزیع ۳ نوع حفره‌ها شامل تقریباً کروی، کروی غیر تخت و حفره‌ها دیسکی شکل تیز را به‌عنوان تابعی از دمای ذوب مجدد نمونه‌ها نشان می‌دهد. با افزایش دمای ذوب مجدد نوع توزیع تغییر کرده است. در نمونه پاشش شده بیش از ۵۵ درصد حفره‌ها از نوع دیسکی شکل تیز است. با انجام عملیات ذوب مجدد نوع و شکل حفره‌ها تغییر کرده و سهم حفره‌ها با شکل‌های کروی و کروی غیر تخت افزایش یافته است.

نتیجه‌گیری

از پودر آلیاژ NiCrBSi به روش پاشش شعله‌ای برای پوشش‌دهی استفاده شد. سپس ذوب مجدد در دماهای ۹۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌منظور بهبود خواص پوشش انجام شد. از تکنیک آنالیز تصویر

¹ Nearly spherical pores

² Non-flat spheroidal pores

³ Sharp disk-shaped pores

مراجع

1. Z. Bergant and J. Grum, *Quality Improvement of Flame Sprayed, Heat Treated, and Remelted Nicrbsi Coatings*, Journal of Thermal Spray Technology, 18 (2009) 380-91.
2. R. Gonzalez, M. A. Garcia, I. Penuelas, M. Cadenas, M. R. Fernández, A. H. Battez and D. Felgueroso, *Microstructural Study of Nicrbsi Coatings Obtained by Different Processes*, Wear, 263(2007) 619-24.
3. N. Serres, F. Hlawka, S. Costil, C. Langlade and F. Machi, *Microstructures of Metallic Nicrbsi Coatings Manufactured Via Hybrid Plasma Spray and in Situ Laser Remelting Process*, Journal of Thermal Spray Technology, 20(2011) 336-43.
4. H. Du, S. W. Lee and J. H. Shin, *Study on Porosity of Plasma-Sprayed Coatings by Digital Image Analysis Method*, Journal of Thermal Spray Technology, 14(2005) 453-61.
5. M. Cherigui, S. Guessasma, N. Fenineche, R. Hamzaoui, O. Kedim and C. Coddet, *Studies of Magnetic Properties of Iron-Based Coatings Produced by a High-Velocity Oxy-Fuel Process*, Materials Chemistry and Physics, 92 (2005) 419-23.
6. P. S. Phani, D. S. Rao, S.V. Joshi and G. Sundararajan, *Effect of Process Parameters and Heat Treatments on Properties of Cold Sprayed Copper Coatings*, Journal of Thermal Spray Technology, 16(2007) 425-34.
7. Z. Wang, A. Kulkarni, S. Deshpande, T. Nakamura and H. Herman, *Effects of Pores and Interfaces on Effective Properties of Plasma Sprayed Zirconia Coatings*, Acta Materialia, 51(2003) 5319-34
8. J. A. Gan and C. C. Berndt, *Quantification and Taxonomy of Pores in Thermal Spray Coatings by Image Analysis and Stereology Approach*, Metallurgical and Materials Transactions A, 44(2013) 4844-58.
9. M. L. Berndt and C. C. Berndt: *in ASM Handbook*, S.D. Cramer and B.S. Covino, Jr., eds., ASM International, Materials Park, OH, 2003.

۴- میانگین محور اصلی از ۳۵ به ۱۵ و قطر معادل حفره‌ها از ۲۰ به ۱۵ میکرومتر برای نمونه پاشش شده و نمونه‌های ذوب مجدد شده تغییر می‌کند. این کاهش در مقادیر قطر معادل و محور اصلی گویای ریزتر شدن حفره‌ها در اثر ذوب مجدد است.

۵- در اثر ذوب مجدد نسبت ابعادی و گردی حفره‌ها به ترتیب از ۰/۵ و ۰/۷ به ۰/۸ و ۰/۹ رسیده است. این بدین معنی است که شکل حفره‌ها از حالت بی‌قاعده، باریک و کشیده به سمت کروی شدن پیش می‌رود. به عبارت دیگر نوع توزیع شکل و اندازه حفره‌ها در اثر ذوب مجدد تغییر می‌کند. در نمونه پاشش شده بیش از ۵۰ درصد حفره‌ها از نوع دیسکی شکل تیز است. درحالی‌که بعد از ذوب مجدد سهم حفره‌ها با شکل‌های کروی و کروی غیر تخت افزایش می‌یابد.

10. J. R. Davis, *Handbook of Thermal Spray Technology*, ASM international, 2004.
11. R. Gonzalez, M. Cadenas, R. Fernandez, J. L. Cortizo and E. Rodríguez, *Wear Behaviour of Flame Sprayed NiCrBSi Coating Remelted by Flame or by Laser*, *Wear*, 262(2007) 301-07.
12. J. M. Miguel, J. M. Guilemany and S. Vizcaino, *Tribological Study of NiCrBSi Coating Obtained by Different Processes*, *Tribology International*, 36(2003) 181-87.
13. H. J. Kim, S. Y. Hwang, C. H. Lee and P. Juvanon, *Assessment of Wear Performance of Flame Sprayed and Fused Ni-Based Coatings*, *Surface and Coatings Technology*, 172(2003) 262-69.
14. M. P. Planche, H. Liao, B. Normand and C. Coddet, *Relationships between NiCrBSi Particle Characteristics and Corresponding Coating Properties Using Different Thermal Spraying Processes*, *Surface and Coatings Technology*, 200(2005) 2465-73.
15. Z. Bergant and J. Grum, *Porosity Evaluation of Flame-Sprayed and Heat-Treated Nickel-Based Coatings Using Image Analysis*, *Image Analysis & Stereology*, 30(2011) 53-62.
16. S. H. Leigh and C. C. Berndt, *Quantitative Evaluation of Void Distributions within a Plasma-Sprayed Ceramic*, *Journal of the American Ceramic Society*, 82(1999) 17-21.