

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

بررسی ریزساختاری تک اسپلت آلومینایی ایجاد شده با فرآیند پاشش شعله‌ای سرعت بالای محلول پیش‌ماده

سعید تقی رضانی^{۱*}، ضیاء والفی^۲

مقاله پژوهشی

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت.

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت.

* s.ramezany2013@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۶	فرآیندهای پاشش حرارتی محلول پیش‌ماده (SPTS) روشی مناسب جهت تولید پوشش‌های با ساختار نانو هستند. به‌واسطه‌ی عدم رخداد کامل واکنش‌هایی نظیر تبخیر حلال و پیرولیز پیش‌ماده، دستیابی به پوشش‌های با خواص کنترل‌شده در یک نرخ رسوب‌دهی رضایت‌بخش کماکان به‌عنوان یک چالش مهم در این فرآیندها مطرح است که نیاز به کنترل دقیق پارامترهای پاشش دارد. در این تحقیق، به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای پاشش شعله‌ای سرعت بالای محلول پیش‌ماده از جمله مقدار سوخت و اکسیژن، فاصله پاشش و نرخ تزریق محلول از آزمون پاشش تک‌اسکن بر روی زیرلایه‌های شیشه‌ای استفاده شد. مورفولوژی اسپلت‌های تشکیل‌شده و مشخصه‌های ساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) بررسی شد. مقایسه‌ی ساختاری در آزمون پاشش تک‌اسکن که در دو نسبت سوخت به اکسیژن انجام شد، نشان داد که در پارامتر شعله با فشار اکسیژن ۶ bar و سوخت ۳ bar در نرخ تزریق محلول پیش‌ماده ۲۰ cm ³ /min و فاصله پاشش ۵ cm به‌عنوان پارامتر بهینه انتخاب شد. در این پارامتر به دلیل پایین بودن نرخ تزریق محلول و انتقال گرمای بیشتر به ازای هر قطره محلول پیش‌ماده و تکمیل فرآیندهایی که در نتیجه آن ذوب و کریستالی شدن اتفاق می‌افتد، تعداد اسپلت‌ها افزایش یافت. همچنین ارزیابی پاشش تک‌اسکن در شعله با فشار اکسیژن ۸ bar و سوخت ۴ bar و فاصله پاشش ۵ cm نشان داد که نرخ تزریق محلول پیش‌ماده ۴۰ cm ³ /min به دلیل افزایش تعداد اسپلت‌های ریز و به‌واسطه‌ی بهبود راندمان پوشش‌دهی مناسب‌تر خواهد بود.
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۹	
کلید واژگان:	
پاشش شعله‌ای سرعت بالا	
پاشش تک‌اسکن	
نیترات آلومینیوم	
محلول پیش‌ماده آلومینا.	

Investigation of Microstructure of Alumina Single-Splate Made By Solution Precursor High-Velocity Flame Spraying

Saeid Taghiramezani ^{1*}, Zia Valefi ²

1, 2- Faculty of Material and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

* s.ramezany2013@gmail.com

Article Information

Original Research Paper

Doi:

20.1001.1.24233226.1401.16.3.2.3

Keywords:

High Velocity Flame Spraying

Single-Scan Spraying

Aluminum Nitrate

Solution Precursor

Alumina.

Abstract

Solution precursor thermal Spraying (SPTS) processes are suitable methods for producing nano-structured coatings. Due to the uncompleted reactions such as solvent evaporation and pyrolysis of the precursor, achieving coatings with controlled properties at a satisfactory precipitation rate remains an important challenge in these processes that needs to precise control of spray parameters. In this study, in order to investigate the effect of Solution precursor high velocity flame spraying parameters such as fuel and oxygen content, spraying distance and solution injection rate, single-scan spraying test was performed on glass substrates. The morphology of the formed splats and their structural characteristics were investigated using Scanning Electron Microscope (SEM). Structural comparison in the single-scan spraying test performed in two ratios of fuel to oxygen, showed that in the flame parameter with oxygen pressure of 6 bar and fuel 3 bar at the injection rate of Solution precursor 20 cm³/min and spray distance of 5 cm was selected as the optimal parameter. In this parameter, due to the low injection rate of the solution and higher heat transfer per drop of the solution precursor and completion of processes that resulting in melting and crystallization, the number of splats increased. Also, evaluation of single-scan spraying in the flame with oxygen pressure of 8 bar and fuel bar of 4 bar and spray distance of 5 cm showed that the injection rate of 40 cm³/min solution precursor would be more appropriate due to increasing the number of fine splats and improving coating efficiency.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Saeid Taghiramezani, Zia Valefi, Investigation of Microstructure of Alumina Single-Splate Made By Solution Precursor High-Velocity Flame Spraying, New Process in Material Engineering, 2022, 16(3), 13-28.

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه آلومینایی به دلیل خواص مکانیکی و حرارتی بسیار خوب، کاربردهای گسترده‌ای به عنوان سرامیک سازه‌ای یا پوشش‌های محافظ پیدا کرده‌اند [۱]. آلومینا از جمله اکسیدهایی است که ساختار کریستالی کامل و فشرده‌ترین شبکه را دارد؛ بنابراین ایجاد یک لایه آلومینای رویی از نفوذ مولکول اکسیژن جلوگیری می‌کند و سبب مقاومت در برابر اکسیداسیون می‌شود. همچنین این پوشش می‌تواند از نفوذ و تماس مستقیم نمک‌های مذاب و عوامل خوردنده نیز جلوگیری کند [۲]. مک‌فرسون^۱ در سال ۱۹۷۰ برای اولین بار به مشخصه‌های نانو در پوشش‌های پاشش حرارتی آلومینایی دست یافت. امروزه این حوزه کاری به‌عنوان یکی از زمینه‌های اصلی در پژوهش‌های صورت گرفته در فرآیندهای پاشش حرارتی شناخته می‌شود [۳]. تشکیل لایه آلومینا توسط ذرات ریز ذوب شده، ایجاد یک ساختار میکروسکوپی ریز می‌کند که به نوبه خود به بهبود خواص مکانیکی مانند استحکام و سختی و مقاومت در برابر سایش بهتر منتج می‌شود. علاوه بر این، مواد نانو ساختار به‌واسطه‌ی خصوصیات منحصربه‌فرد از جمله نسبت سطح به حجم و دانسیته‌ی بالای فصل مشترک‌ها منجر به پایداری ابعادی قابل توجه و نفوذپذیری حرارتی کمتر (به علت پراکنده شدن فونون‌ها توسط عیوب مرزی) خواهد شد. در فرآیندهای پاشش حرارتی، امکان تزریق ذرات ریز (با ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر) به دلیل اثرات نیروهای سطحی روی جریان پودر با استفاده‌ی از سیستم تزریق پودری که عمدتاً در فرآیندهای متعارف پاشش حرارتی استفاده می‌شود، وجود ندارد. در حقیقت، نانو ذرات در صورت استفاده سبب مسدود شدن مسیر انتقال پودر از تزریق کننده به مشعل می‌شوند. برای رفع این مشکل از روش‌هایی نظیر آگلومره کردن پودرها استفاده می‌شود [۴]. همچنین فرآیند پاشش حرارتی با استفاده از مواد مصرفی مبتنی بر مایع توسعه پیدا کرده است تا بر این محدودیت غلبه شود. فرآیندهای پاشش حرارتی سوسپانسیونی و محلول پیش ماده روش‌های مناسبی جهت

تولید پوشش‌های با ساختار نانو هستند. در این فرآیندها، می‌توان یک سوسپانسیون^۲ و یا محلول پیش ماده^۳ را در جت پلاسما یا شعله حاصل از گازهای احتراقی تزریق کرد و پوشش حاوی ذرات با ابعاد نانو پس از رخداد مجموعه‌ای از واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی (پیرولیز و تبلور) تشکیل می‌شود. این فناوری که امکان دستیابی به محدوده وسیعی از پوشش‌ها را به لحاظ ترکیب و میکروساختار فراهم می‌کند به‌واسطه عدم بروز مشکلات ناشی از ناهمگن بودن مواد تزریق شده و پوشش حاصله و نیز رفع مشکلات ایمنی و بهداشتی مربوط به تماس نانو ذرات و اثرات زیست محیطی پودرها مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۵]. فرآیند پاشش شعله‌ای سرعت بالای محلول پیش ماده^۴ یک روش مناسب جهت تولید پوشش‌های متراکم با ساختار نانو است. مشابه فرآیند HVOF^۵ پودری، در فرآیند پاشش شعله‌ای سرعت بالا با تزریق مایع، خواص پوشش نتیجه مستقیم سرعت بالای ذرات است که در جریان گاز مافوق صوت قرار گرفته‌اند و برای کاربردهایی که پوشش با ساختار نانو و با تخلخل کم مورد نظر باشد، مفید هستند [۶-۷]. چن و همکاران^۸ برای اولین بار از فرآیند پاشش شعله‌ای سرعت بالای محلول پیش ماده برای لایه‌نشانی پوشش سرامیکی زمینه آلومینا استفاده کردند. در پوشش‌های ایجاد شده به این روش خصوصیات نظیر تخلخل، استحکام چسبندگی و زبری، وابسته به شکل و نحوه اتصال اسپلت‌ها به یکدیگر و به زیرلایه هستند. مورفولوژی اسپلت‌ها پس از سرد شدن تابعی از پارامترهای فرآیند نظیر توزیع اندازه، سرعت، دما و میزان انجماد ذرات در حال حرکت به سمت زیرلایه و نیز دما و جنس زیرلایه است. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهند که این روش بسیار حساس به پارامترهای فرآیند است و به‌واسطه عدم رخداد کامل واکنش‌هایی نظیر تبخیر حلال پیش ماده و پیرولیز، دستیابی به پوشش‌های با خواص کنترل شده در یک نرخ رسوب‌دهی رضایت‌بخش کماکان به عنوان یک چالش در این زمینه مطرح می‌باشد [۹]. از این رو مطالعاتی در زمینه تأثیر پارامترهای فرآیند پاشش بر مورفولوژی اسپلت‌های منفرد بر

صنعتی مالک اشتر استفاده شد. سیستم مورد نظر برای پاششگویی به نیازهای پاشش مواد به صورت مایع اصلاح شده و سیستم مورد نظر مجهز به سخت افزار تزریق مایع است. شماتیکی از پاشش شعله‌ای سرعت بالای محلول پیش ماده در شکل (۱) آورده شده است. معمولاً تزریق مایع به صورت محوری در محفظه احتراق صورت می‌گیرد و منجر به بهبود انتقال حرارت از شعله به ذرات ریز می‌شود. در این فرایند، از گاز طبیعی فشرده^۸ (CNG) به عنوان گاز سوختی و نیتروژن به عنوان گاز اتمیزه کننده و گاز حامل محلول پیش ماده استفاده شد. تزریق مایع می‌تواند با استفاده از مخازن تحت فشار یا از طریق پمپ‌های مکانیکی انجام شود؛ ولی خورنده بودن محلول‌های نمکی مثل نیترات‌ها و کلرایدها و همچنین سوسپانسیون‌های حاوی ذرات نانو باعث رفتگی و تخریب شدید در تمام قسمت‌های پمپ که مستقیماً در معرض آن هستند، می‌شوند [۶]. از این رو در این پژوهش جهت تزریق محلول پیش ماده به تفنگ پاشش از سیستم تزریق با مخزن تحت فشار استفاده شد. این سیستم امکان کنترل نرخ تزریق محلول پیش ماده با جریان پایدار در فشار ثابت را فراهم می‌کند. باید توجه داشت که تزریق مایع در مشعل HVOF باید در محفظه احتراقی با فشاری که معمولاً ۳-۷ بار است، انجام می‌شود؛ بنابراین در طراحی آن پارامترهایی مانند حداکثر فشار عملیاتی و ضریب ایمنی در نظر گرفته شود.

روی زیرلایه شیشه‌ای با سطح صیقلی انجام شده است. بستر شیشه‌ای اگرچه از زبری سطح متفاوتی نسبت به زیرلایه فلزی ذره‌پاشی^۷ شده که در واقعیت مورد استفاده قرار می‌گیرد، برخوردار است؛ اما می‌تواند به درستی تأثیر پارامترهای پاشش بر مورفولوژی ذرات پس از رسیدن به زیرلایه را تشریح کند. در این تحقیق سعی بر آن است که اثر پارامترهای فرآیندی مثل نرخ تزریق محلول، مقدار سوخت، میزان اکسیژن و فاصله پاشش بر میزان رخدادهای فرآیندهایی نظیر تبخیر حلال و پیرولیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- مواد و روش تحقیق

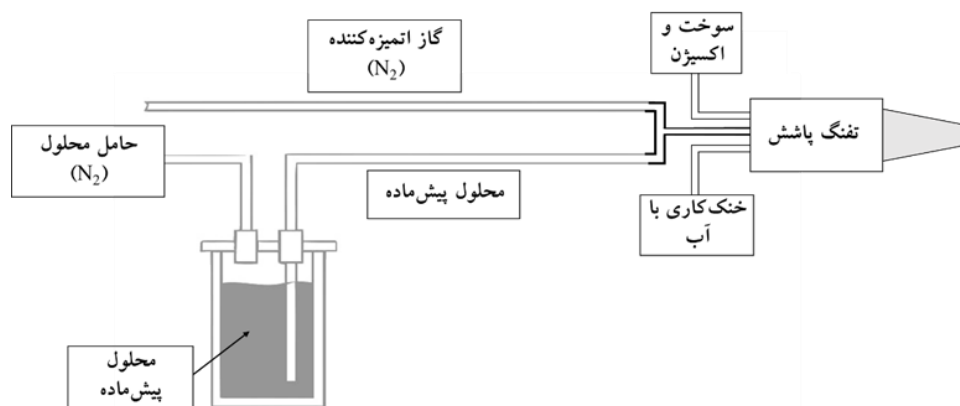
۲-۱- مواد اولیه

در پژوهش حاضر، از زیرلایه‌های شیشه‌ای با سطح کاملاً صیقلی و ابعاد 20×20 mm به منظور مطالعات ریزساختاری مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین جهت ساخت محلول پیش ماده ترکیب Al_2O_3 ، از نمک نیترات آلومینیوم $(Al(NO_3)_3)$ استفاده شد. از حل کردن مقدار ۵۲۰ گرم نیترات آلومینیوم در 300 cm^3 آب مقطر، محلول پیش ماده اشباع برای تولید Al_2O_3 به دست می‌آید.

۲-۲- سیستم پاشش شعله‌ای سرعت بالای

محلول پیش ماده

در این پژوهش جهت انجام فرآیند پاشش حرارتی محلول پیش ماده از یک سیستم پاشش HVOF ساخت دانشگاه



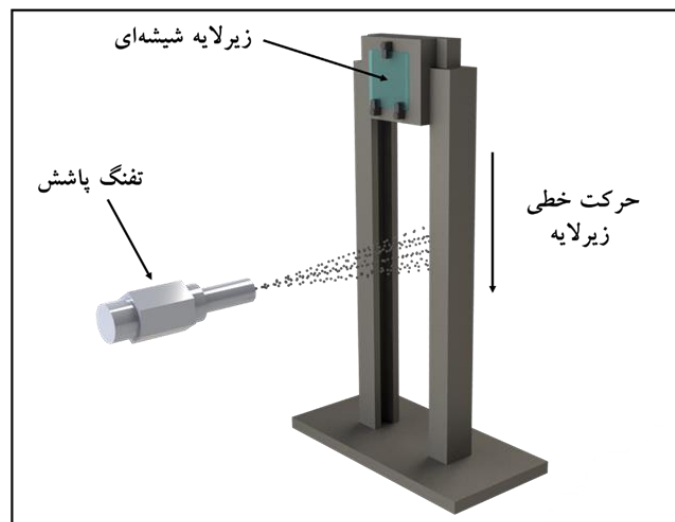
شکل (۱): نمایش شماتیکی پاشش شعله‌ای سرعت بالای محلول پیش ماده.

۳-۲- آزمون پاشش تک‌اسکن بر روی زیرلایه

شیشه‌ای

آزمون پاشش تک‌اسکن بر روی زیرلایه شیشه‌ای روشی شناخته شده جهت بررسی تشکیل اسپلت‌ها، میزان ذوب شوندگی ذرات و درجه پهن شوندگی اسپلت‌ها و همچنین حجم اسپلت‌ها و ذرات ذوب جزئی شده و ذوب نشده تشکیل شده در یک پوشش است [۱۱-۱۰]. با توجه به اطلاعات به دست آمده از آزمون تشکیل اسپلت بر شیشه در چندین پاشش متفاوت، می‌توان با توجه به مورفولوژی‌های شکل گرفته از ذرات پاشش داده شده بر سطح شیشه، بهترین حالت پاشش جهت دستیابی به ریزساختار مورد انتظار را به دست آورد. در فرآیند پاشش تک‌اسکن،

زیرلایه‌های شیشه‌ای با سرعتی حدود ۵۰۰ mm/s از مقابل تفنگ پاشش عبور داده شدند. به این ترتیب تنها تعداد کمی از ذرات بر روی شیشه رسوب کرده و امکان بررسی ذرات و اسپلت‌های منفرد فراهم خواهد بود. در ضمن، در این حالت شرایط سطحی ثابت و تکرارپذیر خواهند بود. شکل (۲) شماتیکی از نحوه انجام آزمون پاشش تک‌اسکن بر روی زیرلایه شیشه‌ای را نشان می‌دهد. پارامترهای پاشش شعله‌ای سرعت بالای محلول پیش‌ماده در جدول (۱) فهرست شده‌اند. پارامترهای متغیر پاشش در این پژوهش شامل مقدار سوخت و اکسیژن، فاصله‌ی پاشش و نرخ تزریق محلول پیش‌ماده هستند.



شکل (۲): نمایی از طراحی مورد استفاده جهت انجام آزمون پاشش تک‌اسکن با زیرلایه شیشه‌ای.

جدول (۱): پارامترهای مورد استفاده در فرآیند پاشش تک‌اسکن بر روی زیرلایه شیشه‌ای

شماره آزمون	کد نمونه	CNG (bar)	اکسیژن (bar)	گاز اتمیزه کننده (N ₂) (bar)	فاصله پاشش (cm)	نرخ تزریق محلول (cm ³ /min)
	(D ₅ F ₂₀) _۱ [*]					۲۰
	(D ₅ F ₄₀) _۱				۵	۴۰
	(D ₅ F ₆₀) _۱					۶۰
۱	(D ₁₀ F ₂₀) _۱	۳	۶	۲		۲۰
	(D ₁₀ F ₄₀) _۱				۱۰	۴۰
	(D ₁₀ F ₆₀) _۱					۶۰
	(D ₅ F ₂₀) _۲					۲۰
	(D ₅ F ₄₀) _۲				۵	۴۰
	(D ₅ F ₆₀) _۲					۶۰
۲	(D ₁₀ F ₂₀) _۲	۴	۸	۲		۲۰
	(D ₁₀ F ₄₀) _۲				۱۰	۴۰
	(D ₁₀ F ₆₀) _۲					۶۰

(*D₅F₂₀: Spray distance: 5cm, Solution precursor feed rate: 20 cm³/min)

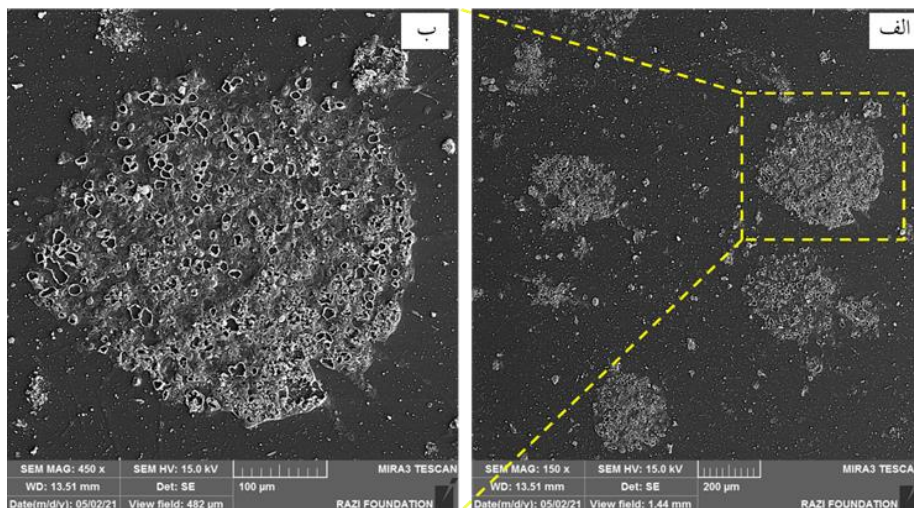
(عدد خارج از پرانتز معرف شماره آزمون می‌باشد.)

تقریباً حدود ۵۰۰-۱۰۰۰ μm متغیر می‌باشد. توزیع اندازه قطرات به شرایط اتمایزینگ قطرات در فرآیند پاشش برمی‌گردد. اتمایزینگ، شکستن جریان مایع به قطرات کوچک‌تر تعریف می‌شود که در دو مرحله اولیه و ثانویه انجام می‌شود. در اتمایزینگ اولیه، محلول پیش‌ماده توسط یک گاز اتمیزه‌کننده به داخل شعله اتمیزه می‌شود. ذرات اتمیزه شده بعد از ورود به منبع تأمین حرارت توزیع اندازه ریزتری را به دست می‌آورند [۱۲]. در واقع دما و سرعت بالای شعله مافوق صوت باعث می‌شوند که قطرات به محض وارد شدن به جت HVOF به قطرات کوچک‌تری متلاشی شوند. تبدیل قطرات محلول پیش‌ماده به قطرات کوچک‌تر توسط شعله به عنوان اتمایزینگ ثانویه شناخته می‌شود [۱۳]. همچنین مشاهده می‌شود که حفرات ریز با ابعاد ۲۰-۲۰۰ μm به صورت یکنواخت در کل رسوب وجود دارد. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهند که حفرات ریز تشکیل شده در درون رسوب می‌توانند ناشی از آزاد شدن گازهای محبوس شده در داخل قطرات مایع باشند. این حفرات در اغلب قسمت‌های ساختار رسوب قابل مشاهده هستند.

به منظور بررسی‌های ریزساختاری سطح لایه‌های شکل گرفته بر روی سطح شیشه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل MIRA3 TESCAN-XMU استفاده شد؛ به همین منظور پیش از قرار دادن نمونه‌ها زیر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح آن‌ها با پوشش نانومتری طلا لایه‌نشانی شد.

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر پارامترهای پاشش بر مورفولوژی ذرات و اسپلت‌های تشکیل شده بر روی بستر شیشه‌ای، نمونه‌های مربوط به آزمون پاشش تک‌اسکن در دو نسبت سوخت به اکسیژن و با نرخ‌های تزریق محلول ۲۰، ۴۰ و ۶۰ cm^3/min در فاصله‌های پاشش ۵ و ۱۰ cm انجام و توسط تصاویر میکروسکوپی الکترونی ثانویه مورد بررسی قرار گرفتند. شکل (۳) تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن آلومینایی با پارامتر $(D_5F_{20})_1$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود قطرات پس از برخورد به زیرلایه شیشه‌ای به شکل دیسک بر روی آن پهن شده‌اند. قطر قطرات اتمیزه شده برای این پارامتر پاشش



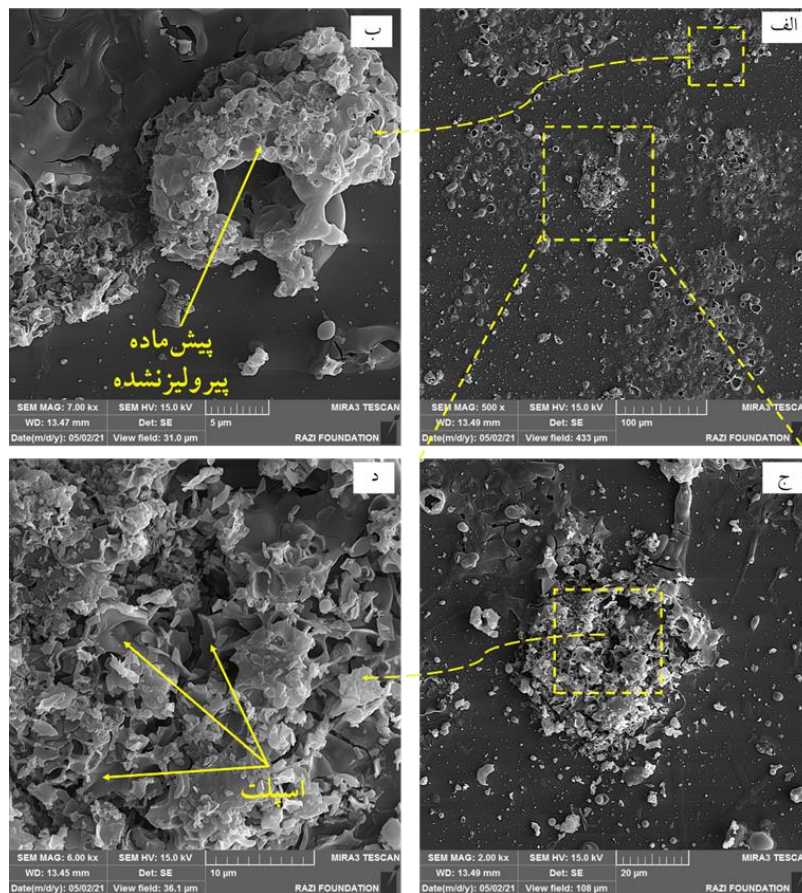
شکل (۳): تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن پوشش آلومینایی با پارامتر $(D_5F_{20})_1$ را در دو بزرگنمایی متفاوت.

مشخصه‌ها شامل قطرات محلول پیش‌ماده که به سطح شیشه رسیده و پهن شده‌اند، پیش‌ماده پیرولیز نشده و اسپلت‌ها هستند. در واقع یک قطره پیش‌ماده بعد از قرارگیری در منبع تأمین حرارت، بسته به مقدار گرمایی که به آن منتقل

شکل (۴) تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پیش‌ماده آلومینایی با پارامتر $(D_5F_{20})_1$ را نشان می‌دهد. در نرخ تزریق محلول پیش‌ماده ۲۰ cm^3/min و در فاصله پاشش ۵ cm، چندین مشخصه عمده را می‌توان تشخیص داد. این

پیش‌ماده به صورت پیرولیز نشده به سطح زیرلایه برسد. همچنین در شکل (۴-د) اسپلت‌های فوق‌العاده ریز با ضخامت کمتر از ۱۰۰ nm را می‌توان مشاهده کرد. همان‌طور که توسط گیل^۹ [۱۴] نشان داده شده است، این ویژگی می‌تواند مشخصه پوشش‌های ایجاد شده با فرآیندهای پاشش حرارتی محلول پیش‌ماده باشد. همچنین استفاده از فرآیند HVOF نیز دلیل دیگری است که در تشکیل اسپلت‌های فوق‌العاده ریز مؤثر است.

می‌شود بعضی یا تمام فرایندهای زیر در آن اتفاق می‌افتد: متلاشی شدن قطره، تبخیر حلال پیش‌ماده، رسوب ماده حل شده در پیش‌ماده، پیرولیز، زینتر، ذوب و تبلور مجدد. قطرات بعد از انجام چند یا تمام این فرایندها روی زیرلایه می‌نشینند و تشکیل پوشش می‌دهند [۵]. در فواصل کوتاه پاشش، به دلیل زمان ماندگاری کمتر قطرات در شعله‌ای با سرعت بالا، فرصت کافی برای انجام واکنش‌های پیرولیز وجود ندارد. در چنین شرایطی ممکن است مقداری از



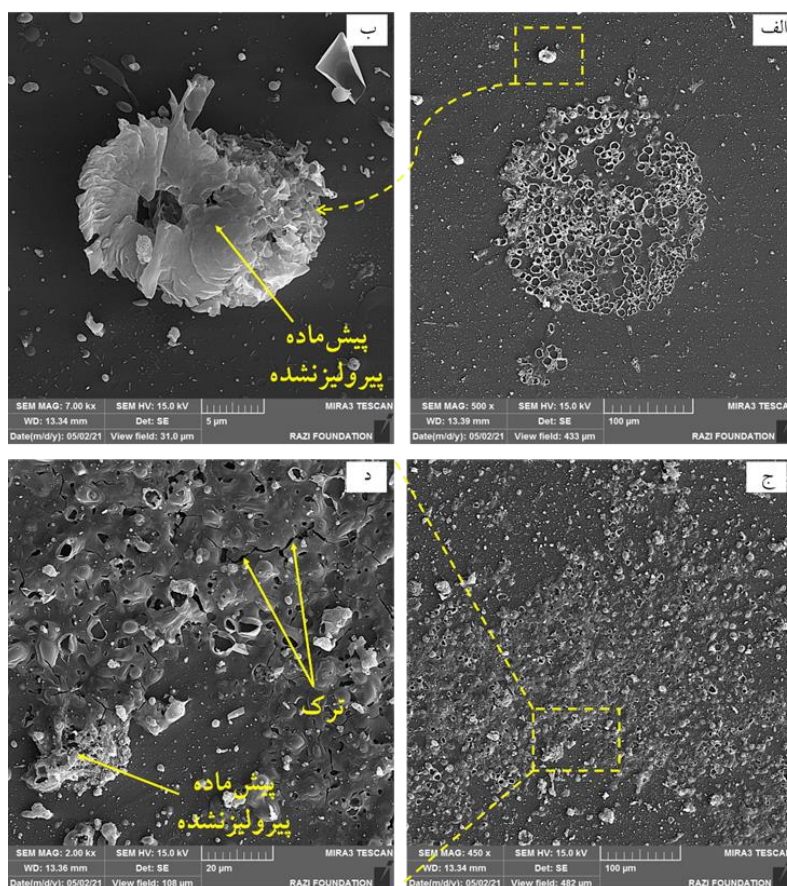
شکل (۴): تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن پوشش آلومینایی با پارامتر (D₅F₂₀) در بزرگنمایی‌های مختلف.

بدان برسند، محدود می‌گردد [۱۵]؛ در چنین شرایطی تمامی قطرات پیش‌ماده در حین فرآیند پاشش نمی‌توانند واکنش‌های تکمیلی که در نتیجه آن‌ها ذوب ماده پوشش اتفاق می‌افتد را تجربه کنند؛ بنابراین کاهش فاصله پاشش و استفاده از فرآیند HVOF، دو عاملی هستند که زمان ماندگاری ذرات در شعله را کاهش می‌دهند و منجر به افزایش مقدار ماده پیرولیز نشده در لایه‌های تشکیل شده بر

شکل (۵-ب) تصویری با بزرگنمایی بیشتر از یک ذره پیرولیز نشده از شکل (۵-الف) را نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد در فواصل پاشش کم، ذرات زودتر به زیرلایه برخورد می‌کنند و مدت زمان کمتری در معرض حرارت قرار می‌گیرند. علاوه بر این قطرات در فرآیند HVOF به سرعت بالایی می‌رسند و به دلیل دمای نسبتاً پایین شعله احتراقی، درجه حرارتی که قطرات می‌توانند

ترک‌های میکروسکوپی در ساختار پوشش باشند. در شرایط واقعی عبورهای متوالی تفنگ پاشش از روی لایه‌هایی که قبلاً تشکیل شده‌اند سبب تبخیر سریع مایع حلال و پیرولیز پیش‌ماده باقیمانده در لایه‌های تشکیل شده می‌شود. تجزیه پیش‌ماده ایجاد انقباض می‌کند و تنش کششی حاصل از آن می‌تواند سبب ایجاد ترک‌هایی در ساختار پوشش شود [۱۶-۱۷]. در اینجا ذکر این نکته ضرورت دارد که در آزمون‌های پاشش تک‌اسکن، گرمای منتقل شده به ذرات بعد از لایه‌نشانی وجود ندارد؛ بنابراین در مورد لایه‌های شکل‌گرفته در آزمون تک‌اسپلت، فقط انقباض ناشی از تبخیر حلال و تنش‌های کششی حاصل از آن‌ها در لحظه برخورد ذرات به عنوان دلیل اصلی تشکیل ترک شناخته می‌شود. این ترک‌ها که شبیه به گل خشک هستند، در اغلب پوشش‌های پاشش حرارتی محلول پیش‌ماده دیده می‌شوند [۱۷].

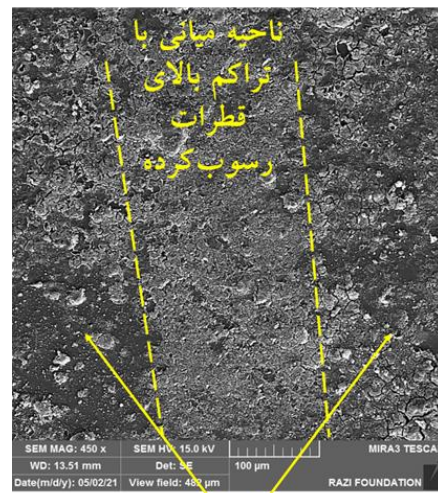
روی شیشه می‌شوند. شکل (۵-ج و د) تصاویر میکروسکوپی الکترونی ثانویه از نواحی کناری شیشه در شرایط پاشش $(D_5F_{40})_1$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ساختار لایه‌های تشکیل شده، علاوه بر حفرات کروی ریز و پیش‌ماده پیرولیز نشده، ترک‌های میکروسکوپی نیز قابل مشاهده هستند. پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی نحوه‌ی تشکیل ترک‌ها در پوشش‌های حاصل از فرآیند پاشش حرارتی انجام شده است و به بررسی پارامترهای مؤثر در این زمینه پرداخته شده است [۱۶-۱۴]. مطالعات انجام‌گرفته نشان می‌دهند که سرد شدن سریع اسپلت‌ها و تنش انقباضی حاصل از آن، اتصال ضعیف اسپلت‌ها و تفاوت ضریب انبساط حرارتی دلایل عمده تشکیل ترک در پوشش‌های پاشش حرارتی هستند؛ ولی در مورد SPTS^۱، نتایج نشان می‌دهند که تبخیر حلال و پیرولیز پیش‌ماده می‌تواند به عنوان دلایل اصلی ایجاد



شکل (۵): تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن پوشش آلومینایی با پارامتر $(D_5F_{40})_1$ (الف) تصویری از یک قطره برخوردی به سطح زیرلایه شیشه‌ای، (ب) تصویری از یک پیش‌ماده پیرولیز نشده در بزرگنمایی بالا، (ج) تصویر از نواحی کناری شیشه در شرایط پاشش $(D_5F_{40})_1$ و (د) تصویر ج با بزرگنمایی بیشتر.

بزرگنمایی‌های بالاتر نشان می‌دهد. با مشاهده شکل (۷) دریافت می‌شود که در فاصله پاشش ۵ cm ساختار لایه تشکیل شده بر روی شیشه شامل پیش‌ماده پیرولیز نشده، رسوبات ژلی، ذرات کروی ریز، رسوبات درشت و ترک‌های میکروسکوپی می‌باشند. از مقایسه شکل (۷) با (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ تزریق محلول از ۴۰ به ۶۰ cm^3/min ، ترک‌ها نیز افزایش یافته است. در واقع با توجه به کم بودن فاصله پاشش، قطرات پیش‌ماده متمیز شده فرصت زیادی برای انجام واکنش‌های تبخیر حلال، پیرولیز و کریستالی شدن ندارند و با توجه به بالا بودن نرخ تزریق محلول در این نمونه و با ثابت بودن سایر پارامترها، گرمای منتقل شده به ازای هر ذره کاهش و حجم زیادی از این قطرات در حالی که تبخیر حلال و یا پیرولیز پیش‌ماده به طور کامل انجام نشده است به زیرلایه رسیده‌اند. همچنین در ساختار تک‌اسپلت ذرات کروی کوچک‌تری با ابعاد حدود ۲۰۰-۵۰nm مشاهده می‌شود. این ذرات از اتمایزینگ ثانویه قطرات محلول پیش‌ماده بعد از تزریق در شعله‌ای با سرعت بالا حاصل می‌شوند. همان‌طور که اشاره شد، زمانی که قطرات وارد شعله‌ای با دمای بالا و سرعت بالا می‌شوند، بسته به واکنش‌های فیزیکی که در معرض آن قرار می‌گیرند، متلاشی شده و ابعاد کوچک‌تری را به دست می‌آورند. این ذرات کروی ریز نشان‌دهنده ذرات متمیز شده‌ای هستند که گرمای کافی جهت انجام عملیات پیرولیز و کریستالی شدن را به دست نیاورده‌اند و یا در نتیجه‌ای اتمایزینگ ثانویه به ذرات کوچک‌تری شکسته شده و سپس مراحل ذوب را تجربه کرده باشند؛ ولی با توجه به اینکه از اندازه ریزی برخوردارند ممکن است تا رسیدن به زیرلایه منجمد شوند. علاوه بر ذرات کروی ریز، ذرات درشت‌تری را می‌توان مشاهده کرد. این ذرات بزرگ‌تر ابعاد حدود ۲-۱۰ μm را دارند و از ذرات کروی کوچک‌تری تشکیل شده است که در حین فرآیند پاشش به یکدیگر متصل شده‌اند و یا اندازه پیش‌ماده اتمایز شده‌ای هستند که بدون متلاشی شدن در شعله (اتمایزینگ ثانویه) به زیرلایه برخورد کرده‌اند.

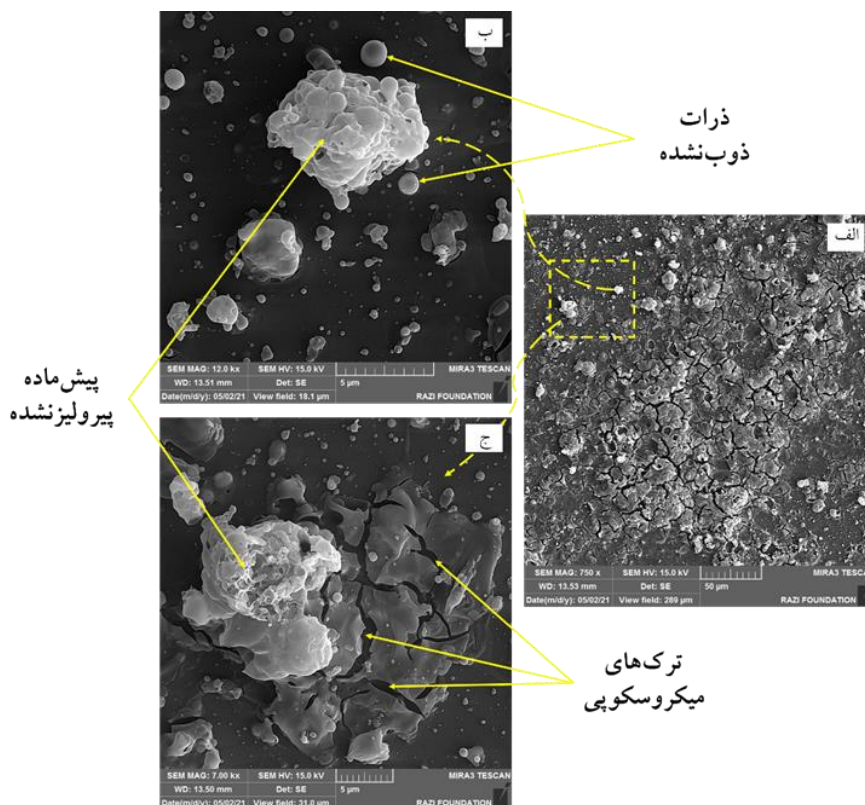
شکل (۶) تصویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن پوشش آلومینایی با پارامتر $(D_5F_{60})_1$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دانسیته قطرات رسوب کرده در ناحیه مرکزی با نواحی اطراف زیرلایه شیشه‌ای متفاوت است. از شکل (۶) مشخص می‌شود که قسمت عمده محلول پیش‌ماده متمیز شده وارد نواحی مرکزی شعله که دارای دمای بیشتری هستند، می‌شوند. در واقع بسته به نحوه تزریق محلول متمیز شده و شرایط اتمایزینگ بخشی از محلول وارد بخش مرکزی شعله می‌شوند و بخش دیگر وارد نواحی اطراف با دمای کمتر خواهند شد. آن بخش از محلول که وارد قسمت مرکزی با ناحیه داغ شده است، می‌تواند تمامی واکنش‌های تبخیر، پیرولیز، تبلور مجدد و ذوب را می‌تواند به طور کامل و یا تا مراحل آخر طی نمایند. در مقابل آن بخش از محلول پیش‌ماده که وارد نواحی با دمای کمتر شعله می‌شوند، نمی‌توانند تمام مراحل ذکر شده را طی نمایند و حتی ممکن است تبخیر حلال پیش‌ماده نیز به طور کامل انجام نشود [۸].



نواحی کناری با تراکم پایین قطرات رسوب کرده

شکل (۶): تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن پوشش آلومینایی با پارامتر $(D_5F_{60})_1$.

شکل (۷) تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن پوشش آلومینایی با پارامتر $(D_5F_{60})_1$ را در



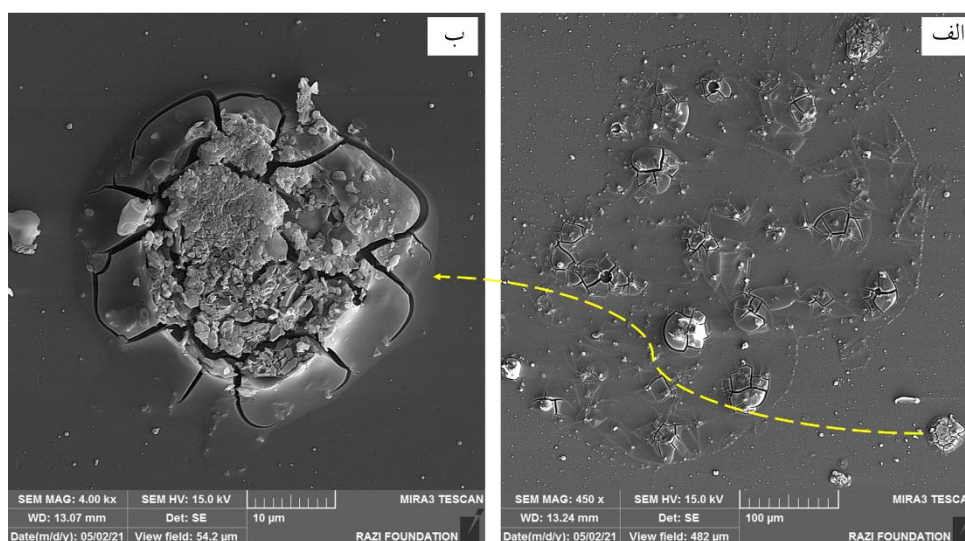
شکل (۷): تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن پوشش آلومینایی با پارامتر $(D_5F_{60})_1$ در بزرگنمایی‌های مختلف.

سرد محیط است [۱۸]. دما و سرعت ذرات در فاصله‌ی حدود ۸۰-۱۰۰ mm، به حداکثر مقدار خواهند رسید و ذرات به آرامی و پس از رسیدن به موقعیت مربوط به حداکثر دما و سرعت، کاهش دما و سرعت را نشان می‌دهند. این نتیجه با تصور غالب، مبنی بر این که با افزایش فاصله‌ی پاشش، به جهت طولانی شدن مدت‌زمان توقف ذرات در جت شعله، میزان گرمای منتقل شده به ذرات و سرعت آن‌ها افزایش می‌یابد، در تضاد است؛ بنابراین به نظر می‌رسد که مورفولوژی متفاوت ذرات حاصل از فرآیند پاشش حرارتی محلول پیش‌ماده تنها وابسته به پارامترهای مختلف پاشش نیست و پارامترهای اتمایزینگ مانند نرخ تزریق محلول پیش‌ماده، دبی و نوع گاز اتمیزه‌کننده، همگی در شرایط اتمایزینگ و موقعیت ذرات در شعله مؤثر هستند. شکل (۸-ب) یک قطره رسوب کرده را در بزرگنمایی بالا نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد این ذره از یک پوسته نیمه مذاب و یک ناحیه مرکزی تجزیه نشده تشکیل شده است؛ این امر بیانگر وجود گرادیان دمایی در داخل ذره و در حین فرایند ذوب است که به ماهیت انتقال حرارت به ذرات در

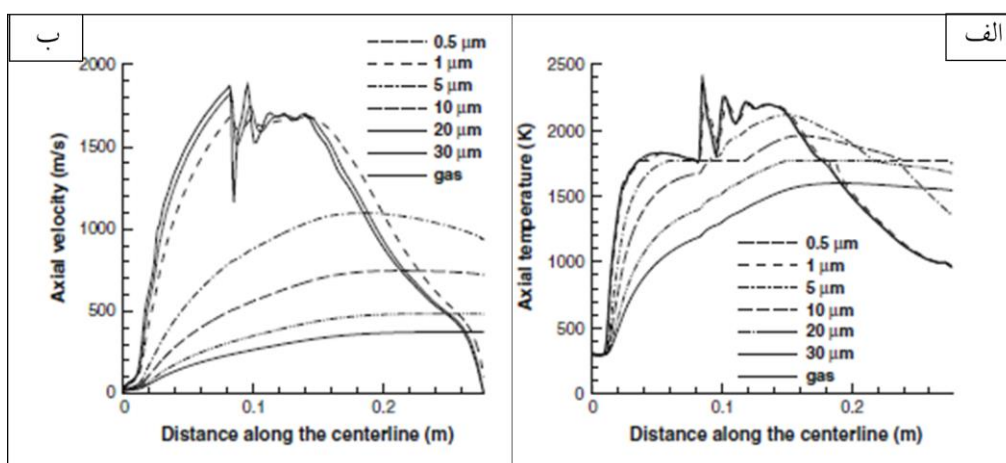
شکل (۸) تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن پوشش آلومینایی با پارامتر $(D_{10}F_{20})_1$ را نشان می‌دهد. در پاشش تک‌اسکن برای این پارامتر هیچ‌گونه اسپلتی مشاهده نشد و ساختارهای شکل گرفته از این سری لایه‌نشانی مورد قبول قرار نگرفت. همان‌طور که مشخص است در فاصله پاشش ۱۰ cm و نرخ تزریق محلول $20 \text{ cm}^3/\text{min}$ مورفولوژی لایه‌های تشکیل شده عمدتاً شامل ذرات تجزیه نشده هستند. در واقع همان‌طور که قبلاً اشاره شد، با توجه به بالا بودن سرعت قطرات در شعله، قطرات با سرعت بالایی از منطقه داغ شعله عبور کرده و با توجه به عدم فرصت کافی برای انجام واکنش‌های فیزیکی (پیرولیز، ذوب و ...)، ذرات به صورت پیرولیز نشده به سطح زیرلایه برخورد می‌کنند. شکل (۹) توزیع سرعت و دما برای شعله HVOF و همچنین ذرات تزریق شده به درون جت HVOF را در راستای محور مرکزی مشعل نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، با فاصله گرفتن از مشعل، دما و سرعت شعله به تدریج کاهش می‌یابند. کاهش دمای شعله ناشی از اثرات مربوط به فاصله گرفتن از منبع تأمین حرارت و هوای

در شکل قابل مشاهده هستند. به نظر می‌رسد این ترک‌ها از ناحیه‌ای در اطراف بخش پیرولیز نشده جوانه زدند و در پوسته منجمد شده در اطراف ذره پیشروی کردند. در ادامه با رسیدن ترک به ناحیه‌ای که ترشوندگی بین پوسته منجمد شده در اطراف و زیرلایه به خوبی اتفاق افتاده است، به سختی انجام می‌شود و رشد ترک متوقف می‌شود. همچنین ضخامت کمتر رسوب در ناحیه بیرونی قطره که تنش پسماند کمتری دارد، می‌تواند دلیل دیگری بر مکانیزم توقف ترک در این ناحیه باشد.

فرآیند پاشش حرارتی مرتبط می‌شود. در فرآیندهای پاشش حرارتی محلول پیش‌ماده، ابتدا سطح خارجی قطرات شروع به گرم شدن می‌کند؛ سپس منطقه مذاب به سمت مرکز قطره گسترش می‌یابد. به دلیل اینکه لایه‌نشانی از فاز مایع طی یک سری واکنش‌های فیزیکی انجام می‌گیرد؛ ممکن است در هر قطره مشخصه‌های مختلفی قابل مشاهده باشد. همان‌طور که از سطح رویی قطره رسوب کرده نیز قابل مشاهده است، به نظر می‌رسد که لایه خارجی قطره در اطراف هسته پیرولیز نشده با برخورد به سطح شیشه به اطراف پخش شده است. همچنین یک سری میکروترک‌ها



شکل (۸): تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن پوشش آلومینایی با پارامتر (D₁₀F₂₀).



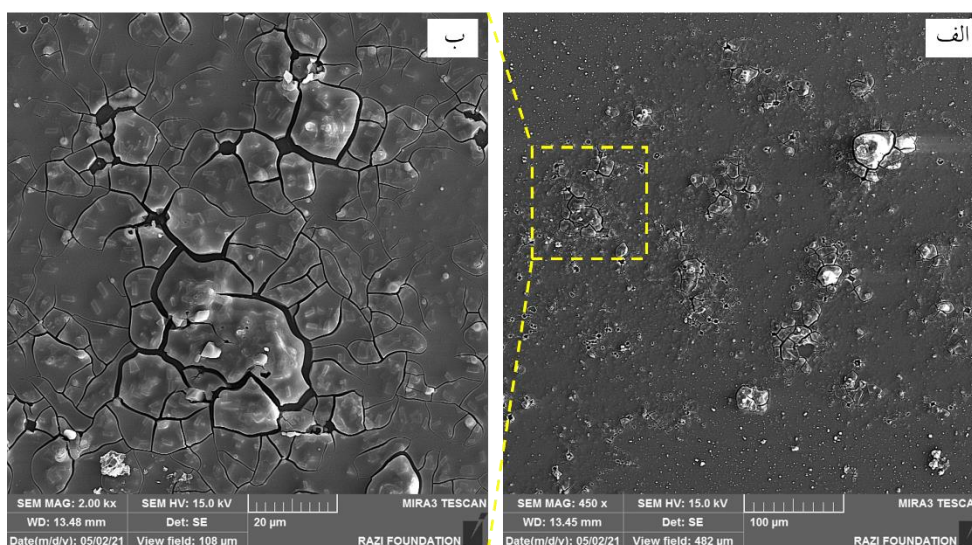
شکل (۹): توزیع دما و سرعت گاز و ذرات در راستای خط مرکزی مشعل HVOF [۱۸].

می‌دهد. مشاهده می‌شود که در پارامتر (D₁₀F₄₀) مورفولوژی لایه‌های تشکیل شده، شامل ذرات تجزیه نشده

شکل (۱۰) تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک اسکن پوشش آلومینایی با پارامتر (D₁₀F₄₀) را نشان

های میکروسکوپی کاهش یابد. همچنین در مقایسه پارامتر $(D_{10}F_{40})_1$ با $(D_5F_{60})_1$ ، علاوه بر افزایش دو برابری فاصله پاشش که زمان توقف قطرات را افزایش می‌دهد، نرخ تزریق محلول از ۶۰ به $40 \text{ cm}^3/\text{min}$ کاهش یافته است. در چنین شرایطی کاهش نرخ تزریق محلول و افزایش فاصله پاشش باعث افزایش گرمای منتقل شده به هر قطره و در نتیجه افزایش نرخ تبخیر حلال و کاهش میزان ترک‌های میکروسکوپی خواهد شد.

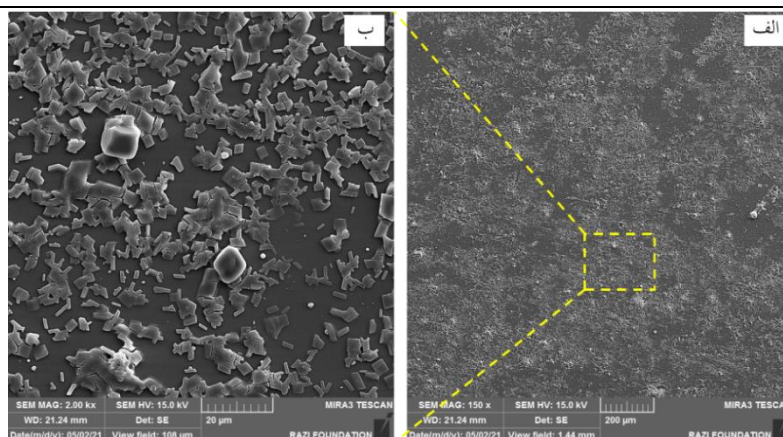
است و همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد نواحی ترک شبیه به گل خشک به دلیل تبخیر حلال نیز مشاهده می‌شوند. دانسیته ترک‌های تشکیل شده در پارامتر $(D_{10}F_{40})_1$ نسبتاً کمتر از پارامترهای $(D_5F_{60})_1$ و $(D_5F_{40})_1$ می‌باشد. در واقع در پارامتر $(D_{10}F_{40})_1$ در مقایسه با $(D_5F_{40})_1$ ، افزایش دو برابری فاصله پاشش سبب می‌شود زمان ماندگاری قطرات در منبع تأمین حرارت افزایش و تبخیر حلال پیش‌ماده به مقدار بیشتری صورت گرفته که باعث می‌شود میزان ترک-



شکل (۱۰): تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن پوشش آلومینایی با پارامتر $(D_{10}F_{40})_1$.

مؤثر هستند. علاوه بر این به نظر می‌رسد افزایش مقدار محلول پیش‌ماده به جهت افزایش تعامل محلول پیش‌ماده با شعله، سرعت کلی شعله را کاهش می‌دهد. در واقع بخشی از انرژی جنبشی شعله HVOF صرف اتمایزینگ ثانویه قطرات می‌گردد؛ بنابراین احتمال دارد با افزایش نرخ تزریق محلول پیش‌ماده، سرعت شعله و در نتیجه سرعت ذرات در جت کاهش و زمان ماندگاری ذرات در شعله افزایش یابد. در چنین شرایطی مقدار کمتر حلال باقیمانده در قطرات اتمیزه شده در شعله به دلیل زمان بیشتر تا رسیدن به سطح زیرلایه باعث می‌شود مقدار ماده پیرولیز نشده و ترک‌های میکروسکوپی در ساختار کاهش یابد.

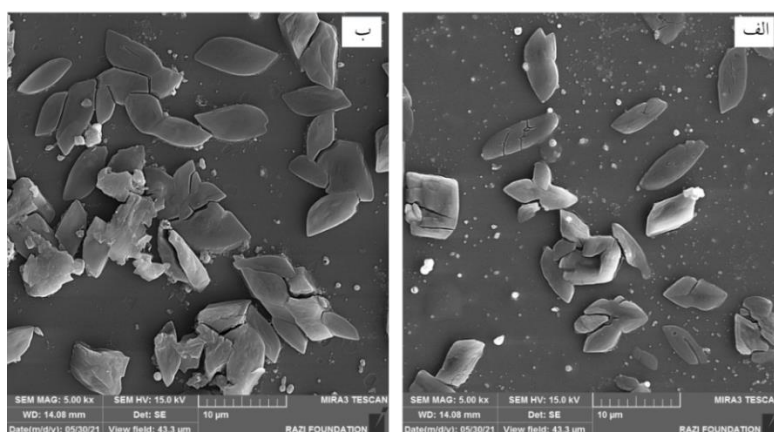
شکل (۱۱) تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن پوشش آلومینایی با پارامتر $(D_{10}F_{60})_1$ را نشان می‌دهد. در این پارامتر که بیشترین نرخ تزریق محلول در شعله HVOF تزریق شده بود انتظار می‌رفت پیش‌ماده‌های پیرولیز نشده و ترک‌های میکروسکوپی در ساختار پوشش مشاهده شوند؛ ولی همان‌طور که مشاهده می‌شود، مورفولوژی لایه‌های تشکیل شده در فاصله پاشش ۱۰ cm و $60 \text{ cm}^3/\text{min}$ متفاوت با ۲۰ و $40 \text{ cm}^3/\text{min}$ است و ترک‌های میکروسکوپی نیز در ساختار پوشش ملاحظه نمی‌شوند. این موضوع نشان می‌دهد که فاصله پاشش و پارامترهای شعله که دما و سرعت قطرات در هنگام برخورد قطرات به زیرلایه را تعیین می‌کنند، بر شرایط اتمایزینگ نیز



شکل (۱۱): تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن پوشش آلومینایی با پارامتر $(D_{10}F_{60})_1$.

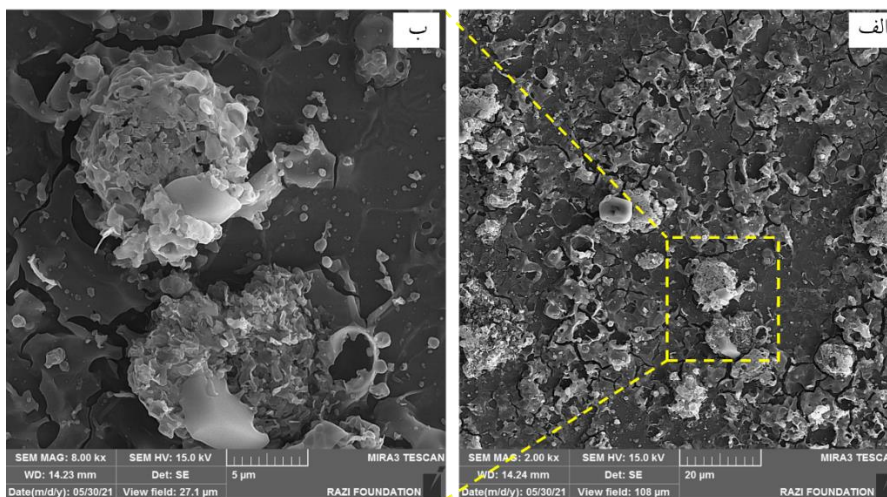
منتقل شده به هر ذره افزایش و قطرات بعد از تبخیر حلال و پیرولیز به زیرلایه برخورد کرده‌اند؛ از طرفی افزایش میزان سوخت و اکسیژن به معنای افزایش حجم گاز وارد شده به داخل نازل است که منجر به سرعت گرفتن جت شعله و در نتیجه ذرات موجود در آن می‌شود. افزایش سرعت ذرات و برخورد قطرات بر روی زیرلایه‌های شیشه‌ای سرد باعث می‌شود پس از برخورد به صورت گسترده ترشح کرده و ذراتی که مواد در آنها از مرکز به اطراف پخش شده‌اند را تشکیل می‌دهند. شکل‌گیری ذرات چندپاره به ساختار کریستالی ذرات مرتبط می‌شود. در واقع ذرات برخورد کرده ماهیت پلی کریستال دارند. در مواد پلی کریستال، دانه‌هایی با جهت‌گیری متفاوت وجود دارد که این بدین معنی است که تعداد صفحات کریستالی هم‌خانواده در جهات مختلف وجود دارد. به نظر می‌رسد که پس از برخورد ذرات پلی کریستال به سطح صیقلی، انرژی جنبشی ذرات می‌تواند باعث چندپارگی مواد پلی کریستال شوند.

شکل (۱۲-الف و ب) به ترتیب تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن ذرات آلومینایی با پارامترهای $(D_5F_{20})_2$ و $(D_5F_{40})_2$ را نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش دو برابری نرخ تزریق محلول، تراکم لایه‌های رسوب کرده بر روی بستر شیشه‌ای افزایش یافته است. با بررسی مورفولوژی پوشش‌ها مشخص شده است که هیچ تغییر عمده‌ای در ساختار میکروسکوپی برای این دو پارامتر وجود ندارد. مورفولوژی لایه‌های تشکیل شده که به طور یکنواخت توزیع شده‌اند و هیچ ترکی مشاهده نمی‌شود. همچنین با توجه به تصاویر می‌توان دریافت که تمامی ذرات ایجاد شده در این شرایط از نوع چندپاره بوده و ترشح ذرات، محصول تلاشی شدن ذرات اولیه پس از برخورد به زیرلایه و جهش قطرات برخورد کرده به خارج از بخش مرکزی آنها هستند. در واقع با افزایش میزان سوخت و اکسیژن، آنتالپی شعله نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه در این دو نمونه نرخ تزریق محلول نسبتاً کم بوده، گرمای



شکل (۱۲): تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن پوشش آلومینایی، الف) $(D_5F_{20})_2$ و ب) $(D_5F_{40})_2$.

ایجاد شده با استفاده از محلول پیش‌ماده با فاصله پاشش و نرخ تزریق محلول یکسان ولی با نسبت سوخت به اکسیژن بیشتر نیز مشاهده شد. همان‌طور که قبلاً بیان شد، بالا بودن نرخ تزریق محلول و فاصله پاشش کم باعث ایجاد پیش‌ماده‌های پیرولیز نشده و ترک‌های میکروسکوپی در ساختار پوشش می‌شوند.

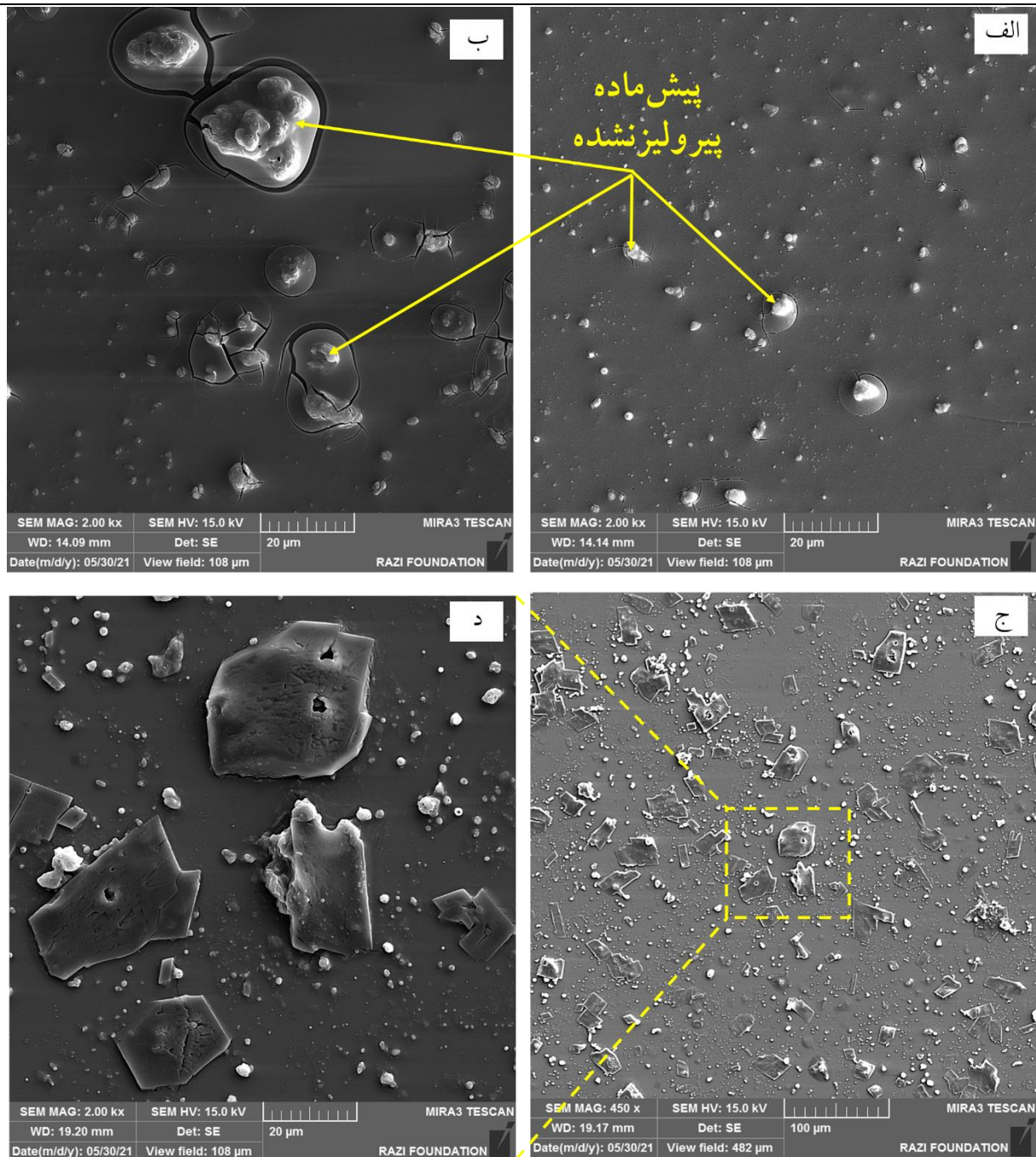


شکل (۱۳): تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن پوشش آلومینایی با پارامتر $(D_5F_{60})_2$.

نمی‌کند. شکل (۱۴-ج و د) تصاویر میکروسکوپی الکترونی از لایه‌های شکل گرفته بر روی زیرلایه شیشه‌ای با پارامتر $(D_{10}F_{60})_2$ را در دو بزرگنمایی متفاوت نشان می‌دهد. در ساختار لایه‌های شکل گرفته علاوه بر اسپلت‌ها یک سری ذرات تجزیه نشده مشاهده می‌شود. در واقع در پوشش‌های پاشش حرارتی، مورفولوژی اسپلت‌ها پس از سرد شدن تابعی از پارامترهای فرآیند نظیر توزیع اندازه قطرات، سرعت، دما و میزان انجماد ذرات در حال حرکت به سمت زیرلایه و نیز دما و جنس زیرلایه است. همان‌طور که بیان شد، فاصله بالای پاشش منجر به زمان توقف بیشتر و کریستالی شدن ذرات می‌شود و در ادامه انرژی جنبشی بالای ذرات که از شعله مافوق صوت دریافت می‌کنند، عامل اصلی چندپاره شدن اسپلت‌ها پس از برخورد به زیرلایه شیشه‌ای سرد گزارش شده است [۹]. همچنین وجود ذرات تجزیه نشده در این پارامتر نسبت به $(D_{10}F_{40})_2$ مربوط به افزایش نرخ تزریق محلول پیش‌ماده به $60 \text{ cm}^3/\text{min}$ می‌باشد.

شکل (۱۳) تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن پوشش آلومینایی با پارامتر $(D_5F_{60})_2$ را نشان می‌دهد. با بررسی شکل (۱۳) چند مشخصه بر روی شیشه شامل پیش‌ماده پیرولیز نشده، رسوبات ژلی و ترک‌های میکروسکوپی مشاهده می‌شود. از مقایسه شکل (۱۳) با شکل (۷) مشاهده می‌شود که وضعیتی مشابه برای لایه‌های

شکل (۱۴) تصاویر میکروسکوپی الکترونی از لایه‌های Al_2O_3 تشکیل شده در پاشش تک‌اسکن روی بستر شیشه‌ای در نرخ تزریق محلول پیش‌ماده ۲۰، ۴۰ و $60 \text{ cm}^3/\text{min}$ در فاصله پاشش ۱۰ cm را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه با کاهش نرخ تزریق محلول پیش‌ماده، گرمای منتقل شده به ازای هر ذره افزایش می‌یابد، انتظار می‌رفت که در شرایط پاشش $(D_{10}F_{20})_2$ و $(D_{10}F_{40})_2$ میزان ذرات پیرولیز نشده کاهش و درصد اسپلت‌ها افزایش یابد؛ ولی با توجه به اینکه ساختار لایه‌های شکل گرفته از ذرات تجزیه نشده تشکیل شده است، می‌توان نتیجه گرفت که در فرآیندهای پاشش حرارتی محلول پیش‌ماده، پارامترهای مختلف پاشش از جمله نرخ تزریق محلول، فاصله پاشش، گاز آمیزه‌کننده و دبی آن عواملی هستند که می‌توانند بر اتمایزینگ قطرات پیش‌ماده و در حصول نتیجه نهایی نیز مؤثر باشند. به نظر می‌رسد پارامترهای ثابت پاشش با نرخ تزریق محلول ۲۰ و $40 \text{ cm}^3/\text{min}$ در فاصله پاشش ۱۰ cm همخوانی ندارد و شرایط را برای اتمایزینگ مناسب قطرات پیش‌ماده فراهم



شکل (۱۴): تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پاشش تک‌اسکن پوشش آلومینایی، الف) $(D_{10}F_{20})_r$ ، ب) $(D_{10}F_{40})_r$ ، ج) $(D_{10}F_{60})_r$ و د) $(D_{10}F_{60})_r$ در بزرگنمایی بالاتر

۴- نتیجه گیری

ماده پیرولیز نشده در لایه‌های تشکیل شده بر روی شیشه می‌شوند.

۳) حفرات ریز تشکیل شده در درون رسوب می‌توانند ناشی از آزاد شدن گازهای محبوس شده در داخل قطرات مایع باشند. همچنین در مورد لایه‌های شکل گرفته در آزمون تک‌اسپلت، انقباض ناشی از تبخیر حلال و تنش‌های کششی

۱) از نتایج آزمون ۱، نرخ تزریق محلول $20 \text{ cm}^3/\text{min}$ در فاصله پاشش ۵ cm به دلیل تعداد بالای اسپلت‌های ریز می‌تواند به عنوان پارامتر بهینه معرفی شود.
۲) در فواصل کوتاه پاشش، به دلیل زمان ماندگاری کمتر قطرات در شعله‌ای با سرعت بالا، فرصت کافی برای انجام واکنش‌های پیرولیز وجود ندارد و منجر به افزایش مقدار

MCrAlY اعمال شده به روش HVOF، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۰، صفحه ۸۰-۶۷، ۲۰۱۶.

[8] D. Chen, E. H. Jordan & M. Gell, "Solution precursor high-velocity oxy-fuel spray ceramic coatings", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 29, no. 16, pp. 3349-3353, 2009.

[9] M. Pasandideh-Fard, V. Pershin, S. Chandra & J. Mostaghimi, "Splat shapes in a thermal spray coating process: simulations and experiments," *Journal of thermal spray technology*, vol. 11, no. 2, pp. 206-217, 2002.

[10] S. Brossard, "Microstructural Analysis of Thermal Spray Coatings by Electron Microscopy," University of New South Wales, 2010.

[11] A. T. T. Tran, M. Hyland, T. Qiu, B. Withy & B. James, "Effects of surface chemistry on splat formation during plasma spraying," *Journal of thermal spray technology*, vol. 17, no. 5-6, pp. 637-645, 2008.

[12] H. Kassner, R. Siegert, D. Hathiramani, R. Vassen & D. Stoeber, "Application of suspension plasma spraying (SPS) for manufacture of ceramic coatings," *Journal of thermal spray technology*, vol. 17, no. 1, pp. 115-123, 2008.

[13] H. Kaßner, R. Vaßen & D. Stöver, "Study on instant droplet and particle stages during suspension plasma spraying (SPS)," *Surface and coatings technology*, vol. 202, no. 18, pp. 4355-4361, 2008.

[14] M. Gell et al., "Thermal barrier coatings made by the solution precursor plasma spray process," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 124-135, 2008.

[15] S. A. Deshpande, *Thermal spray coatings: Insights into microstructural evolution and high temperature behavior across length scales*. State University of New York at Stony Brook, 2004.

[16] L. Xie et al., "Formation of vertical cracks in solution-precursor plasma-sprayed thermal barrier coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 201, no. 3-4, pp. 1058-1064, 2006.

[17] M. Gell, L. Xie, X. Ma, E. H. Jordan & N. P. Padture, "Highly durable thermal barrier coatings made by the solution precursor plasma spray process," *Surface and Coatings Technology*, vol. 177, pp. 97-102, 2004.

حاصل از آن‌ها در لحظه برخورد ذرات به عنوان دلیل اصلی تشکیل ترک شناخته می‌شود.

(۴) از نتایج آزمون ۲ به نظر می‌رسد هر دو پارامتر لایه‌های شکل گرفته با نرخ تزریق ۲۰ و $40 \text{ cm}^3/\text{min}$ در فاصله پاشش ۵ cm به دلیل تکمیل پیرولیز و مراحل کریستالی شدن مناسب است. همچنین بدیهی است که نرخ تزریق $40 \text{ cm}^3/\text{min}$ به واسطه‌ی بهبود راندمان پوشش دهی مناسب‌تر خواهد بود.

۵- مراجع

[1] H. Grewal, H. Singh & A. Agrawal, "Microstructural and mechanical characterization of thermal sprayed nickel-alumina composite coatings," *Surface and coatings Technology*, vol. 216, pp. 78-92, 2013.

[2] A. Afrasiabi, M. Saremi & A. Kobayashi, "A comparative study on hot corrosion resistance of three types of thermal barrier coatings: YSZ, YSZ+ Al₂O₃ and YSZ/Al₂O₃," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 478, no. 1, pp. 264-269, 2008.

[3] P. Fauchais, "Thermal Spray Fundamentals/ Fauchais, P., Heberlein, J., Boulos, M," NY: Springer, p. 1600, 2014.

[4] E. Bouyer, D. Branston, G. Lins, M. Müller, J. Verlegen & M. von Bradke, "Progress in Plasma Processing of Materials ed P Fauchais," ed: New York, USA: Begell House, 1997.

[۵] س. تقی‌رمضانی، ض. والفی، ن. احسانی، "بررسی خواص اکسیداسیون و شوک حرارتی پوشش سپر حرارتی کامپوزیتی YSZ/Al₂O₃ با آلومینای ایجاد شده با فرآیند پاشش حرارتی محلول پیش‌ماده،" فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۴، شماره ۴، صفحه ۹۰-۷۷، ۲۰۲۰.

[6] J. Rauch, G. Bolelli, A. Killinger, R. Gadow, V. Cannillo & L. Lusvardi, "Advances in high velocity suspension flame spraying (HVSFS)," *Surface and Coatings Technology*, vol. 203, no. 15, pp. 2131-2138, 2009.

[۷] س. س. خلیفه سلطانی، ر. ابراهیمی کهریزسنگی، ف. نعیمی، "بررسی رفتار سینتیکی اکسیداسیون ایزوترم دمای بالای پوشش‌های

۶- پی‌نوشت

- [1] Mcpherson
- [2] Suspension
- [3] Solution Precursor
- [4] Solution Precursor High-Velocity Flame Spraying
- [5] High Velocity Oxy-Fuel
- [6] Chen et al
- [7] Grit Blasting
- [8] Compressed Natural Gas
- [9] Gell
- [10] Solution Precursor Thermal Spraying
- [11] Mud-Crack

[18] M. Li & P. D. Christofides, "Modeling and control of high-velocity oxygen-fuel (HVOF) thermal spray: a tutorial review," Journal of thermal spray technology, vol. 18, no. 5-6, p. 753, 2009.