

تأثیر پارامترهای پاشش حرارتی پلاسمایی بر روی مقدار تخلخل پوشش سایش پذیر YSZ-10wt.% LaPO₄ با بکارگیری روش سطح پاسخ (RSM)

فاطمه داور

محسن حاجیان فروشانی، مرتضی شمعیان و مهدی صالحی

دانشکده شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهدی رستمی

دانشکده سلامت عمومی (آمار)، دانشگاه ساسکاچوان کانادا

(دریافت مقاله: ۹۴/۰۱/۲۶ - پذیرش مقاله: ۹۴/۰۴/۱۵)

چکیده

با توجه به تاثیر چشمگیر مقدار تخلخل بر رفتار سایش پذیری پوشش های سرامیکی و وابستگی مقدار تخلخل به پارامترهای پاشش حرارتی، هدف از انجام این پژوهش توسعه مدل تجربی به منظور تعیین رابطه مقدار تخلخل با پارامترهای پاشش حرارتی پلاسمایی در هوا برای پوشش سایش پذیر YSZ-10wt.%LaPO₄ با بکارگیری روش RSM است. روش طراحی آزمایش فول فاکتوریل دو سطحی به منظور تعیین اثر سه پارامتر مهم، جریان (در دو سطح ۴۰۰ و ۸۰۰ آمپر)، نرخ گاز اولیه (در دو سطح ۲۵ و ۴۰ لیتر بر دقیقه) و نرخ گاز ثانویه (در دو سطح ۰ و ۸ لیتر بر دقیقه) بر مقدار تخلخل مورد استفاده قرار گرفت. تخلخل نمونه ها با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی به کمک نرم افزار آنالیز تصویری ImageJ اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار جریان، افزایش نرخ گاز ثانویه و کاهش نرخ گاز اولیه، مقدار تخلخل به طور پیوسته کاهش می یابد. علاوه بر این پارامترهای جریان و نرخ گاز اولیه به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را بر روی مقدار تخلخل پوشش دارند. واژه های کلیدی: پوشش سایش پذیر، تخلخل، فسفات لانتانوم، زیرکونیای پایدار شده با ایتریا، طراحی آزمایش.

Influences of atmospheric plasma spraying parameters on the porosity value of YSZ-10 wt.% LaPO₄ abradable coating using response surface methodology (RSM)

M. Hajian- Foroushani, M. Shamanian and M. Salehi

Department of Materials Science and Engineering, Isfahan University of Technology

F. Davar

Department of Chemistry, Isfahan University of Technology

M. Rostami

University of Saskatchewan

(Received 15 April 2015, accepted 6 July 2015)

Abstract

Due to the significant effect of porosity on the abradability behavior of ceramic abradable coatings and dependence of porosity value on the thermal spraying parameters, the aim of this research is to develop an empirical relationship between the atmospheric plasma process parameters and porosity value of YSZ-10wt.%LaPO₄ abradable coating by surface response methodology. Full factorial design was used to investigate the effects of three varying principal parameters at two levels, namely, the current (400 and 800 A), the primary gas flow rate (25 and 40 lit/min) and the secondary gas flow rate (0 and 8 lit/min), on porosity of coating. Porosity was measured using optical and SEM images with software image analyzer (ImageJ). Results revealed that value of the porosity constantly decreases with increasing of current and secondary gas flow rate and with decreasing of primary gas flow rate. Furthermore, current and primary gas flow rate have highest and lowest impact on the porosity level, respectively.

Keywords: Abradable Coatings, Porosity, Lanthanum phosphate, YSZ, Design of Experiment.

E-mail of corresponding author: Mohsen.hajian@ma.iut.ac.ir.

مقدمه

مورد استفاده قرار می‌گیرد به تازگی به عنوان پوشش سایش-پذیر در مناطق داغ توربین‌های گازی مورد استفاده قرار گرفته است [۸ و ۲]. بنابراین با استفاده از پوشش سرامیکی YSZ به عنوان پوشش سایش‌پذیر علاوه بر افزایش راندمان، اثرات مضر ناشی از دمای بالا بر زیرلایه فلزی نیز به دلیل نقش سد حرارتی این پوشش کاهش می‌یابد. با وجود همه خواص یاد شده برای پوشش‌های سایش‌پذیر زیرکونیایی، رفتار سایش‌پذیری این پوشش‌ها نسبت به پوشش‌های زمینه فلزی ضعیف‌تر بوده و در اثر تماس لبه پره با آنها، لبه پره دچار آسیب می‌شود [۲]. به دلیل دمای کاری بالای پوشش-های سایش‌پذیر زیرکونیایی تنها ماده روانکاری که در حال حاضر به منظور بهبود رفتار سایش‌پذیری، به این پوشش‌ها اضافه می‌شود، نیتريد بور با ساختار هگزاگونالی (h-BN) است. هر چند با اضافه شدن نیتريد بور رفتار سایش‌پذیری پوشش‌های زیرکونیایی بهبود می‌یابد اما با توجه به رسانایی حرارتی بالای نیتريد بور، رفتار سد حرارتی پوشش ضعیف شده و باعث آسیب رسیدن به زیرلایه می‌شود [۹ و ۲]. تلاش‌های زیادی در زمینه تولید ماده روانکاری که بتواند به شکل هم‌زمان رفتار سایش‌پذیری مناسب و سد حرارتی خوبی داشته باشد، انجام گرفته است. فسفات لانتانوم (LaPO_4) روانکار جدیدی است که رسانایی حرارتی پایینی ($W/m.K$) ۱/۵ در دمای 1000°C داشته و تا دمای ذوب (2070°C)، ساختار و پایداری خود را حفظ می‌کند. علاوه بر این ضریب انبساط حرارتی LaPO_4 $9/6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (در محدوده 20°C تا 1000°C) است که نزدیک به ضریب انبساط حرارتی YSZ ($11/1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) است [۹]. بنابراین پوشش YSZ/LaPO_4 می‌تواند به عنوان یک پوشش سایش‌پذیر بسیار مناسب به جای پوشش‌های موجود مورد استفاده قرار گیرد [۹].

تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد رفتار سایش‌پذیری پوشش‌های سرامیکی به شکل چشمگیری به مقدار تخلخل موجود در پوشش بستگی داشته و با تغییر مقدار تخلخل که

پوشش‌های آب‌بندی سایش‌پذیر^۱ به منظور افزایش راندمان توربین‌های گازی با استفاده از روش‌های پاشش حرارتی بر سطح استاتور توربین‌های گازی اعمال می‌گردند [۱]. پوشش‌های سایش‌پذیر با کاهش فاصله بین روتور و استاتور، حجم گازهای عبوری از فاصله بین روتور و استاتور را کاهش و در مقابل حجم گازهای عبوری از بین پره‌های روتور را افزایش داده که در نتیجه باعث افزایش راندمان توربین گازی می‌شوند [۲ و ۱]. با افزایش دمای محفظه در حین سرویس، انبساط حرارتی در راستای طولی پره‌ها باعث ازدیاد طول آنها شده و موجب برخورد لبه پره با سطح پوشش می‌گردد. در این شرایط پوشش‌های سایش‌پذیر به عنوان یک پوشش فدا شونده عمل کرده تا در اثر برخورد لبه پره با پوشش، پوشش سایش‌پذیر ساییده شده و کمترین آسیب به پره دوار وارد گردد [۳]. بنابراین پوشش‌های مورد استفاده باید به اندازه کافی نرم بوده تا در هنگام چنین برخوردهایی لبه پره از هرگونه آسیبی در امان باشد. در مقابل پوشش‌های مصرفی می‌بایست استحکام و سختی کافی نیز جهت مقاومت به فرسایش در برابر برخورد گازهای داغ و ذرات معلق درون آن را داشته باشند [۴]. با توجه به خواص یاد شده تنها تعداد محدودی از مواد مهندسی به عنوان پوشش‌های سایش‌پذیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از جمله آنها می‌توان به پوشش‌های نیکل-گرافیت، MCrAlY -پلی‌استر، آلومینیوم-سیلیسیم-پلی‌استر، زیرکونیای پایدار شده با ایتريا (YSZ) و آلومینا-منیزیا اشاره کرد [۳-۸].

در مقاطع داغ توربین‌های گازی نظیر پره‌های ردیف اول که دما تا بالای 1000°C افزایش می‌یابد، استفاده از پوشش‌های سایش‌پذیر زمینه فلزی با محدودیت روبرو بوده و پوشش‌های سرامیکی تنها گزینه موجود جهت پوشش‌دهی این مناطق است [۲]. زیرکونیای پایدار شده با ایتريا (YSZ) که سالها است به عنوان پوشش سد حرارتی در توربین‌های گازی

(جزیی) پارامترهای پاشش حرارتی را برای پوشش دهی پودر سد حرارتی YSZ بهینه کرده که مقدار تخلخل در بیشترین حالت برابر ۲۵ درصد بوده است [۱۶]. در پژوهشی که توسط کارثیکیان^۹ و همکارانش بر روی بهینه‌سازی پارامترهای پاشش حرارتی در پوشش دهی پودر YSZ انجام گرفته است بیشترین مقدار تخلخل برابر با ۲۸ درصد گزارش گردیده است [۱۷].

در میان همه روش‌های طراحی آزمایش روش طراحی آزمایش سطح پاسخ^{۱۰} (RSM) یکی از جدیدترین و بهترین روش‌های طراحی آزمایش به شمار می‌رود که می‌تواند تأثیر همزمان پارامترها را بر خواص پوشش به شکل دقیقی نشان دهد. تروزینسکی^{۱۱} و همکارانش با استفاده از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ، حد مطلوب سختی را در پوشش سرمته WC-۱۲Co با بهینه کردن پارامترهای پاشش حرارتی به دست آورده‌اند [۱۸].

با توجه به اینکه هیچ گونه اطلاعاتی در رابطه با بهینه‌سازی پارامترهای پاشش حرارتی پلاسمایی اتمسفری برای پوشش دهی پودر YSZ/LaPO₄ در منابع وجود ندارد، هدف از انجام این پژوهش تعیین رابطه بین پارامترهای پاشش حرارتی پلاسمایی اتمسفری با مقدار تخلخل در پوشش کامپوزیتی سایش پذیر YSZ-10%wt.LaPO₄ با استفاده از روش طراحی آزمایش فول فاکتوریل و به کارگیری روش RSM است.

مواد و روش تحقیق

آماده‌سازی زیرلایه

ابتدا نمونه‌هایی از جنس فولاد ST37 در ابعاد mm ۳۰×۲۰×۵ بریده شده و سپس با استفاده از سنگ مغناطیس سنگ‌زنی شد تا دو سطح کاملاً موازی ایجاد شود. با توجه

خود تابع پارامترهای فرآیند پاشش حرارتی است، رفتار سایش‌پذیری نیز تغییر می‌کند [۲ و ۸]. بنابراین انتخاب درست پارامترهای پاشش حرارتی نظیر جریان الکتریکی، فاصله پاشش، نرخ تزریق پودر، نرخ گاز ثانویه، نرخ گاز اولیه و ... برای رسیدن به پوشش با کیفیت مطلوب از اهمیت بسزایی برخوردار است. فرقانی^۱ و همکارانش با تغییر پارامترهای پاشش حرارتی در پوشش دهی پودر TiO₂ مقدار تخلخل را از حدود ۳ درصد به حدود ۱۲ درصد و مقدار سختی را از ۸۷۸ ویکرز به ۶۲۲ ویکرز تغییر دادند [۱۰]. تیروملیک^۲ و همکارانش نیز با تغییر پارامترهای پاشش حرارتی در پوشش دهی پودر Al₂O₃ مقدار تخلخل را از ۵ درصد به ۱۸ درصد افزایش دادند [۱۱]. گیوساسما^۳ و همکارانش نیز نشان دادند مقدار تخلخل با افزایش مقدار جریان و افزایش مقدار گاز هیدروژن (گاز ثانویه)، کاهش می‌یابد [۱۲]. اسکرایونی^۴ و همکارانش نیز تأثیر گاز ثانویه را بر مقدار تخلخل در پوشش YSZ بررسی کرده و مشاهده کردند با تغییر در مقدار گاز ثانویه مقدار تخلخل تا حدود ۱۵ درصد تغییر می‌کند [۱۳]. با توجه به زیاد بودن تعداد پارامترها و محدوده وسیع هر کدام در فرآیند پاشش حرارتی پلاسمایی در هوا استفاده از روش‌های طراحی آزمایش^۵ (DOE) برای رسیدن به خواص (تخلخل) مطلوب بهترین روش از نظر زمانی و اقتصادی است. کینگسول^۶ و همکارانش با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی پارامترهای بهینه پاشش حرارتی پلاسمایی را برای ایجاد پوششی از جنس کامپوزیت تنگستن-کبالت به دست آورده‌اند [۱۴]. ونگ^۷ و همکارانش نیز با استفاده از روش طراحی آزمایش به پارامترهای بهینه جهت پوشش دهی پودر YSZ-Ni دست یافتند [۱۵]. رامچاندران^۸ و همکارانش نیز با استفاده از روش طراحی آزمایش فاکتوریل کسری

7-Wang

8-Ramachandran

9-Karthikeyan

10-Response surface methodology

11-Troczynski

1-Forghani

2-Thirumalaikumarasamy

3-Guessasma

4-Scrivani

5-Design of experiment

6-Kingswell

به اینکه در فرایندهای پاشش حرارتی چسبندگی پوشش به زیرلایه به شدت تابع زبری سطح زیرلایه است نمونه‌ها قبل از پاشش حرارتی تحت فرایند خشن‌پاشی با ذرات SiC قرار گرفت و پوشش‌دهی نمونه‌ها بلافاصله پس از خشن‌پاشی انجام شد تا از ایجاد هرگونه آلودگی و تشکیل هرگونه لایه اکسیدی بر سطح زیر لایه جلوگیری شود. پارامترهای خشن‌پاشی در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱. پارامترهای خشن‌پاشی سطح زیرلایه

ماده ساینده	مش	فاصله (cm)	فشار گاز	زاویه
SiC	۲۵	۱۵	۳ (bar)	۹۰

شناسایی و انتخاب پارامترهای پاشش حرارتی

به منظور تعیین رابطه بین مقدار تخلخل با پارامترهای پاشش حرارتی ابتدا پارامترهای موثر در فرایند پاشش حرارتی مشخص شدند که مهمترین آنها عبارت‌اند از:

مقدار جریان (A)، مقدار ولتاژ (V)، نرخ گاز اولیه (lpm)، نرخ گاز ثانویه (lpm)، نرخ تزریق پودر (gpm) و فاصله پاشش (cm).

با توجه به زیاد بودن تعداد پارامترها سه پارامتر جریان، نرخ گاز ثانویه و نرخ گاز اولیه که بر اساس امکانات کارگاه و اطلاعات موجود در مقالات پارامترهای موثرتری در فرآیند پاشش حرارتی هستند به عنوان پارامترهای متغیر و سایر پارامترها در طی فرآیند ثابت در نظر گرفته شدند [۱۶ و ۱۹]. در این پژوهش گاز ثانویه در فرآیند پاشش حرارتی بر خلاف معمول گاز نیتروژن (N₂) انتخاب گردید که به دلیل انتقال حرارت کمتر آن نسبت به گاز هیدروژن (H₂) مقدار ذوب ذرات را کاهش داده و دستیابی به مقادیر بالایی از تخلخل را امکان‌پذیر می‌سازد.

تعیین مقادیر حدی و طراحی آزمایش

مقادیر حدی در روش‌های طراحی آزمایش بر اساس اطلاعات موجود در مقالات و امکانات کارگاه مشخص می‌گردند. در این آزمایش حد پایین و بالای جریان به ترتیب

برابر ۴۰۰ (-۱) و ۸۰۰ (۱) آمپر در نظر گرفته شد. در مقادیر کمتر از ۴۰۰ آمپر مقدار ذوب ناچیز بوده که علاوه بر این که چسبندگی پوشش به لایه میانی بسیار ضعیف است راندمان فرآیند نیز پایین است. در مقادیر بالاتر از ۸۰۰ آمپر نیز به دلیل ذوب زیاد علاوه بر تبخیر سطحی ذرات، تنش‌های داخلی به شدت افزایش یافته و موجب کنده شدن پوشش از لایه میانی می‌گردد. مقادیر بالا و پایین گاز ثانویه به ترتیب ۸ (۱) و ۰ (-۱) لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد. افزایش گاز ثانویه به مقادیر بالاتر موجب آسیب رسیدن به زیرلایه می‌شود. در این آزمایش از گاز آرگون به عنوان گاز اولیه استفاده شد که بر اساس مطالعات انجام گرفته مقادیر ۴۰ (۱) و ۲۵ (-۱) لیتر بر دقیقه به ترتیب به عنوان حدود بالا و پایین گاز اولیه در نظر گرفته شد [۱۶]. در مقادیر کمتر از ۲۵ و بیشتر از ۴۰ لیتر بر دقیقه راندمان فرایند به شکل چشمگیری کاهش می‌یابد. از آنجایی که در روش فول فاکتوریل تمام حالات ممکن مورد آزمون قرار می‌گیرد و با توجه به اینکه در این طراحی برای هر یک از ۳ پارامتر ۲ سطح مختلف در نظر گرفته شد تعداد $2^3 = 8$ آزمون انجام گرفت.

علاوه بر این برای اطمینان بیشتر از صحت روابط به دست آمده و تعیین تقعر یا تحدب، نقطه مرکزی نیز با ۵ تکرار انجام شد که در مجموع ۱۳ آزمایش انجام گرفت. طراحی آزمایش با استفاده از نرم افزار Design Expert 7.0.0 انجام شد. در جدول ۲ پارامترهای هر آزمایش با هر دو مقدار کدی و واقعی نمایش داده شده‌اند.

فرآیند پاشش حرارتی

فرآیند پاشش حرارتی با استفاده از دستگاه پاشش حرارتی پلاسمایی اتمسفری ساخت شرکت Metallization و تفنگ PS50 Metallization انجام پذیرفت. در فرآیند پاشش حرارتی از پودر NiCrAlY به عنوان لایه میانی و از پودر

جدول ۲. پارامترهای پاشش حرارتی برای آزمون‌های انجام گرفته.

شماره آزمون	مقادیر کدی		مقادیر واقعی			پاسخ (مقدار تخلخل)	
	گاز ثانویه	گاز اولیه	جریان	گاز ثانویه	گاز اولیه	میکروسکوپ نوری	میکروسکوپ الکترونی روبشی
۱	۱	۱	۱	۸	۴۰	۱۶/۴	۱۱/۸
۲	-۱	۱	۱	۰	۴۰	۱۸/۹	۱۴/۹
۳	۱	-۱	-۱	۸	۲۵	۲۳/۵	۲۰/۱
۴	-۱	-۱	-۱	۰	۲۵	۳۲/۱	۲۷/۱
۵	۱	-۱	۱	۸	۲۵	۱۱/۹	۷/۴
۶	-۱	-۱	۱	۰	۲۵	۱۵/۲	۱۱/۱
۷	۱	۱	-۱	۸	۴۰	۲۹/۴	۲۳/۱
۸	-۱	۱	-۱	۰	۴۰	۴۰/۷	۲۹/۳
۹	۰	۰	۰	۴	۳۲	۲۵/۳	۱۷/۱
۱۰	۰	۰	۰	۴	۳۲	۲۱/۶	۱۶/۳
۱۱	۰	۰	۰	۴	۳۲	۲۲/۴	۱۵/۸
۱۲	۰	۰	۰	۴	۳۲	۲۲/۲	۱۶/۹
۱۳	۰	۰	۰	۴	۳۲	۲۵/۶	۱۷/۸

برش و هم در حین سنباده‌زنی به شکلی قرار گرفتند که پوشش همواره تحت تنش‌های فشاری قرار گرفته و از وارد شدن هرگونه آسیبی به پوشش جلوگیری شود. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها با میکروسکوپ نوری OLYMPUSE-BX60M مورد ارزیابی و مشاهده قرار گرفت و تصاویری با وضوح 3456×5184 Pixel که تصاویر بسیار مناسبی جهت آنالیز تصویری است، تهیه گردید. به منظور اندازه‌گیری دقیق‌تر مقدار تخلخل تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه SEM مدل MI30 ساخت شرکت Philips تهیه گردید. در نهایت مقدار تخلخل با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویری ImageJ اندازه‌گیری شد. برای تعیین مقدار تخلخل در هر نمونه تعداد

YSZ-10 wt.% LaPO₄ به عنوان لایه رویی استفاده شده و پوشش‌های با ضخامت ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ میکرون ایجاد گردید. پارامترهای پاشش حرارتی برای اعمال لایه میانی و لایه رویی در جدول ۳ و مشخصات پودرهای مورد استفاده در جدول ۴ قابل مشاهده است.

آماده‌سازی و مشخصه‌یابی نمونه‌های پوشش داده شده
پس از پایان فرآیند پوشش‌دهی، نمونه‌ها بر اساس استاندارد E1920 برای بررسی متالوگرافی توسط دستگاه برش^۱ مقطع زده شده، مانت گردیده و توسط سنباده‌های مختلف سنباده زنی شد و در نهایت با استفاده از ذرات آلومینا با اندازه متوسط $0.5 \mu\text{m}$ پولش گردید. نمونه‌ها هم در طی فرآیند

رابطه پاسخ (مقدار تخلخل) با متغیرهای ورودی (متغیرهای فرآیند پاشش حرارتی) در معادله دو جمله‌ای روش سطح پاسخ به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

که با توجه به سه جمله متغیر (سه پارامتر متغیر) تعریف شده چند جمله‌ای به صورت زیر بسط پیدا می‌کند:

$$Y = a_0 + a_1(A) + a_2(B) + a_3(C) + a_{12}(AB) + a_{13}(AC) + a_{23}(BC) \quad (3)$$

در جایی که a_i ها مقادیر ثابتی بوده که به مقدار تاثیر هر متغیر بر مقدار پاسخ بستگی دارد. ضرایب معادله فوق از روش رگرسیون خطی و به کمک نرم افزار Design Expert

۵ تصویر با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر مورد آنالیز قرار گرفت و میانگین آنها به عنوان مقدار تخلخل هر نمونه گزارش شد.

نتایج و بحث

تعیین رابطه تخلخل و پارامترهای پاشش

برای به دست آوردن رابطه بین مقدار تخلخل و پارامترهای پاشش حرارتی، از روش سطح پاسخ استفاده شد که بر اساس مجموعه از معادلات ریاضی و آماری استوار است [۲۰]. بر اساس نتایج به دست آمده مقدار تخلخل (p) تابع مقدار جریان (A)، نرخ گاز اولیه (B) و نرخ گاز ثانویه (C) است که می‌تواند به صورت زیر بیان گردد:

$$P = f(A, B, C) \quad (1)$$

جدول ۳. پارامترهای پاشش حرارتی

پارامتر	NiCrAlY	YSZ-10 wt.% LaPO ₄
جریان (A)	۶۰۰	متغیر طبق جدول ۲
نرخ گاز ثانویه (Lit./min)	۶	متغیر طبق جدول ۲
نرخ گاز اولیه (Lit./min)	۳۵	متغیر طبق جدول ۲
فاصله پاشش (cm)	۱۵	۱۱
نرخ تغذیه پودر (gr/min)	۴۰	۲۵

جدول ۴. مشخصات پودرهای مصرفی

مشخصات	YSZ	NiCrAlY	LaPO ₄
ترکیب	ZrO ₂ -8% Y ₂ O ₃	Cr22%-Al 10%-Y1%-Ni base	LaPO ₄ خالص
شرکت سازنده	PAC- USA	GTV-Germany	تولید شده در آزمایشگاه
نام تجاری	۲۰۰۸P	۶۰. ۴۶. ۸	ندارد
اندازه دانه پودر	۲۰-۱۰۰	۱۵-۴۵	۱۵-۴۵
مورفولوژی	کروی	کروی	گوشه دار

۰/۰۵ بوده که نشان دهنده عدم تاثیر آنها بر مقدار تخلخل است و بنابراین معادله ۳ بر اساس ضرایب معنادار به صورت زیر بیان می‌شود:

$$(۴) \quad + (\text{مقدار جریان}) \cdot ۰/۰۳۸۰۰ - ۳۶/۱۴۱۶۷ = \text{مقدار تخلخل} \\ + (\text{نرخ گاز ثانویه}) \cdot ۱/۲۲۵۰۰ - (\text{نرخ گاز اولیه}) \cdot ۰/۲۲۳۳۳ \\ (\text{مقدار جریان} \times \text{نرخ گاز ثانویه}) \cdot ۱۰^{-۳}$$

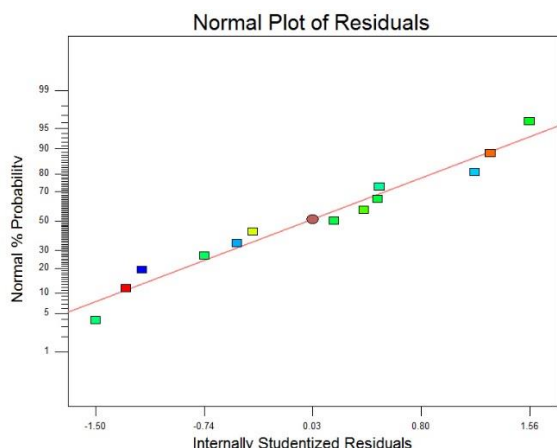
بررسی صحت مدل

به منظور بررسی کفایت و صحت رابطه به دست آمده ابتدا نتایج حاصل از آنالیز واریانس (ANOVA) مورد بررسی

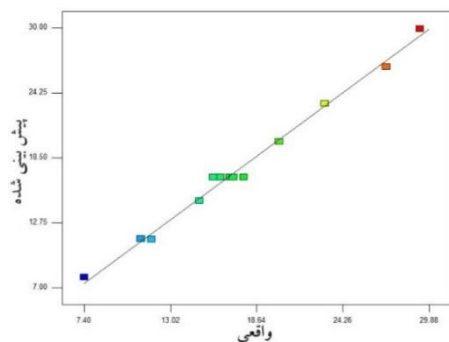
7.0.0 تعیین گردید. در روش‌های طراحی آزمایش ضرایب رگرسیون بر اساس مقدار P به دو دسته ضرایب موثر (معنا دار) و ضرایب بدون تاثیر (بی‌معنا) تقسیم‌بندی می‌شوند. بر این اساس ضرایبی که مقدار P آنها کمتر از ۰/۰۵ باشد ضرایب معنادار و در غیر این صورت ضرایب بدون معنا محسوب می‌شوند. با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌گردد مقدار P برای سه پارامتر جریان (A)، نرخ گاز اولیه (B) و نرخ گاز ثانویه (C) و همچنین تاثیر متقابل (اندرکنش)^۱ جریان و گاز ثانویه (AC) کمتر از ۰/۰۵ بوده که نشان دهنده معنادار و موثر بودن آنها بر روی مقدار تخلخل است. اما مقادیر P برای تاثیر متقابل جریان و گاز اولیه (AB) و همچنین تاثیر متقابل گاز اولیه و گاز ثانویه (BC) بزرگتر از

جدول ۵. نتایج آنالیز واریانس.

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F مقدار	P مقدار	
مدل	۴۴۷/۴۹	۶	۷۴/۸۱	۱۵۸/۹۷	۰/۰۰۰۱ >	معنا دار
جریان (A)	۳۶۹/۹۲	۱	۳۶۹/۹۲	۷۸۶/۰۶	۰/۰۰۰۱ >	
گاز اولیه (B)	۲۲/۴۴	۱	۲۲/۴۴	۴۷/۶۹	۰/۰۰۱	
گاز ثانویه (C)	۵۰/۰۰	۱	۵۰/۰۰	۱۰۶/۲۵	۰/۰۰۰۱	
AB	۱/۱۳	۱	۱/۱۳	۲/۳۹	۰/۱۸۲۷	
AC	۵/۱۲	۱	۵/۱۲	۱۰/۸۸	۰/۰۲۱۵	
BC	۰/۲۵	۱	۰/۲۵	۰/۵۲	۰/۵۰۲۹	
انحنا	۵/۳۶	۱	۵/۳۶	۱۱/۳۹	۰/۰۱۹۸	معنا دار
باقیمانده (خطا)	۲/۳۵	۵	۰/۴۷	-	-	
عدم برازش	۰/۰۰۵	۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۸۵۱	۰/۹۳۰۹	بی معنا
خطای خالص	۲/۳۵	۴	۰/۵۹	-	-	
انحراف معیار	۰/۶۹		ضریب تشخیص ^۲	۰/۹۹۴۸		
میانگین	۱۷/۵۹		ضریب تشخیص تصحیح شده	۰/۹۸۸۵		
ضریب تغییرات	۳/۹		ضریب تشخیص پیش‌بینی شده	۰/۹۹۱۳		
آدقت کافی	۴۰/۷۸۸					



شکل ۱. نمودار احتمال نرمال.



شکل ۲. نمودار مقادیر پیش‌بینی شده بر حسب مقادیر واقعی.

برای اعتبارسنجی^۳ رابطه به دست آمده یک نمونه با پارامترهای تصادفی (جریان Amp ۷۰۰، نرخ گاز اولیه ۳۰ Lit/min و نرخ گاز ثانویه ۶ Lit/min) پوشش داده شد و مقدار تخلخل آن اندازه‌گیری گردید. مقدار تخلخل برابر با ۱۴/۱ درصد اندازه‌گیری شد. با مراجعه به رابطه ۴ مقدار تخلخل پیش‌بینی شده، برابر ۱۳/۰۸ درصد است که مطابقت نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد. نکته قابل توجهی که در سایر پژوهش‌ها به آن اشاره نشده است تفاوت مقدار تخلخل اندازه‌گیری شده با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری و تصاویر میکروسکوپ الکترونی است. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود مقدار تخلخل اندازه‌گیری شده

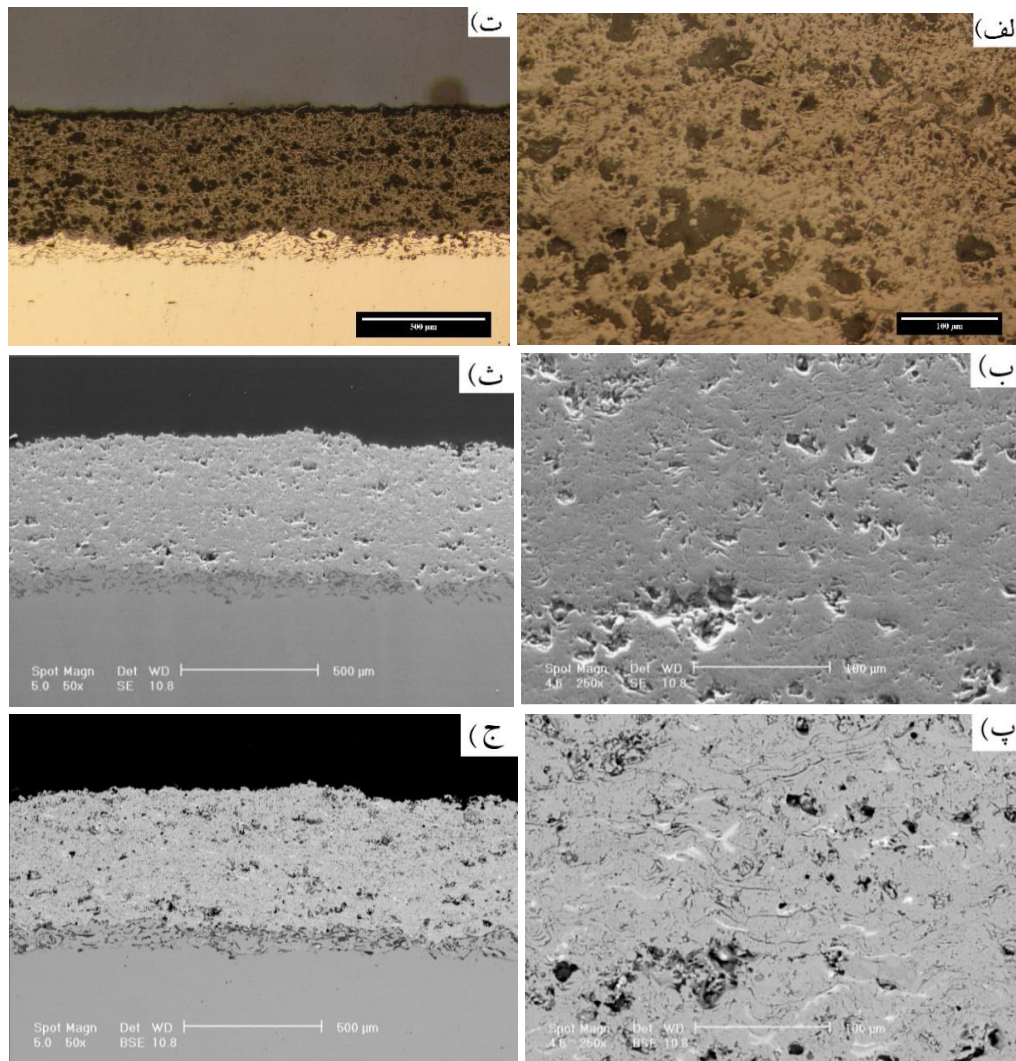
قرار گرفت. لازم به ذکر است در این پژوهش مقدار سطح اطمینان برابر ۹۵٪ در نظر گرفته شد. با مراجعه به جدول ۵ مشاهده می‌گردد مقدار P مدل حاصل کمتر از ۰/۰۰۰۱ بوده که نشان از اعتبار بسیار بالای مدل به دست آمده (بیشتر از ۹۹/۹۹ درصد) دارد. به عبارت دیگر احتمال اینکه مدل به صورت تصادفی به دست آمده باشد کمتر از ۰/۰۱٪ می‌باشد. بدون معنا بودن مقدار عدم برازش نیز با فرض اولیه که بر مبنای خطی بودن تغییرات پاسخ بین دو سطح یک پارامتر تعریف شده است، مطابقت داشته و صحت رابطه بدست آمده را تایید می‌کند. توزیع نرمال داده‌ها در نمودار NPP^۱ که در شکل ۱ قابل مشاهده است، صحت نتایج

حاصل از آنالیز واریانس را تایید می‌کند.

علاوه بر این به منظور بررسی صحت برازش^۲ مدل از ضریب تشخیص (R-squared) استفاده شد. عدد ۰/۹۹۴۸ برای ضریب تشخیص کفایت مدل حاصل را تایید می‌کند. به عبارت دیگر ۹۹/۴۸٪ از اعداد پیش‌بینی شده با اعداد واقعی (حاصل از آزمایش) مطابقت داشته است.

مقدار ضریب تشخیص همواره بین ۰ و ۱ قرار داشته و با نزدیک شدن به عدد ۱ دقت مدل خطی افزایش می‌یابد. نمودار مقادیر پیش‌بینی شده بر حسب مقادیر واقعی (شکل ۲) نیز تطابق مقادیر پیش‌بینی شده را با مقادیر اندازه‌گیری شده تایید می‌کند.

در نهایت نسبت سیگنال به نویز (دقت کافی) به عنوان آخرین نتیجه استخراج شده از آنالیز واریانس مورد بررسی قرار گرفت. مقدار ۰/۷۸ برای نسبت سیگنال به نویز نیز کفایت مدل را تایید می‌کند (مقادیر بزرگتر از ۴ قابل قبول است).



شکل ۳. تصاویر ریزساختار پوشش $YSZ-10 \text{ wt.}\% \text{ LaPO}_4$ تولید شده با پارامترهای سری ۲ در بزرگنمایی‌های متفاوت، الف و ت) با استفاده از میکروسکوپ نوری، ب و ث) با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی با آشکارگر الکترون‌های ثانویه و پ و ج) با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی با آشکارگر الکترون‌های برگشتی.

و بنابراین مقدار تخلخل بیشتر از مقدار واقعی اندازه‌گیری می‌شود. علاوه بر این ذرات ذوب نشده و نیمه ذوب شده موجود در پوشش نیز می‌توانند به راحتی در حین سنباده زدن از جای خود خارج شوند [۱۷]. در این موارد نیز میکروسکوپ نوری به دلیل عمق میدان بسیار کم قابلیت تشخیص این مناطق را از تخلخل‌های واقعی نداشته و مقدار تخلخل را بیشتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. شکل شماره

با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری در همه موارد از مقدار اندازه‌گیری شده با تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی بیشتر است. به دلیل عمق میدان^۱ بسیار کم میکروسکوپ‌های نوری در مقایسه با میکروسکوپ الکترونی، در مناطقی که تخلخل‌های نزدیک به یکدیگر وجود دارد امکان تمیز دادن این حفرات از یکدیگر توسط میکروسکوپ نوری وجود نداشته و همگی آنها به اضافه مناطق بین آنها به صورت یک تخلخل بزرگ دیده می‌شوند

۳) الف-ج) شش تصویر متفاوت از یک پوشش (تولید شده با پارامترهای سری ۲) را نشان می‌دهد.

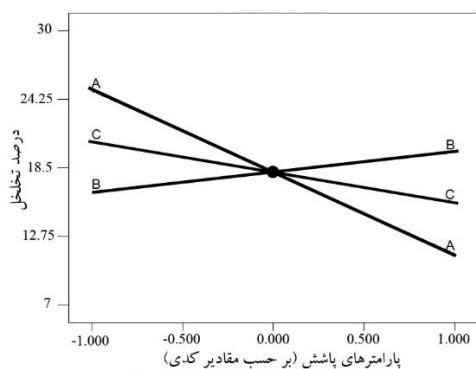
چگونگی تأثیر پارامترهای پاشش بر مقدار تخلخل

به منظور تعیین چگونگی تأثیر پارامترهای پاشش حرارتی بر مقدار تخلخل، تغییرات مقدار تخلخل با پارامترهای پاشش حرارتی در شکل ۴ ترسیم شد. با توجه به این دیاگرام، مشاهده می‌گردد با افزایش مقدار جریان و گاز ثانویه مقدار تخلخل به طور پیوسته کاهش یافته و با افزایش گاز اولیه مقدار تخلخل به طور پیوسته افزایش می‌یابد.

با تغییر در مقدار جریان، توان پلاسمای تغییر کرده و به تبع آن دما و سرعت ذرات نیز تغییر می‌کند [۱۱ و ۱۹]. در مقدار جریان‌های کم توان پلاسمای کاهش یافته و مقدار ذرات ذوب نشده یا نیمه ذوب شده افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی با برخورد ذرات به سطح زیرلایه یا لایه‌های قبلی پوشش، به دلیل عدم ذوب کافی، آنها توانایی تغییر شکل از حالت کروی به حالت اسپلت^۲ را نداشته و باعث افزایش مقدار تخلخل می‌گردد. در حالی که در توان‌های بالای پلاسمای مقدار ذوب ذرات و در نتیجه سیالیت آنها افزایش یافته و پس از برخورد آنها به سطح، ذرات کاملاً تغییر شکل داده و درون خلل و فرج‌های موجود وارد شده و بنابراین مقدار تخلخل کاهش می‌یابد. علاوه بر این با توجه به اینکه شیب خط هر پارامتر در نمودار شکل ۴ متناسب با مقدار تأثیر آن پارامتر بر مقدار تخلخل است، می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر جریان بیشترین تأثیر را بر مقدار تخلخل دارد. علاوه بر شیب نمودار، بزرگی ضریب فیشر (مقدار F) نیز مقدار تأثیر هر پارامتر را بر مقدار تخلخل نشان می‌دهد. بر این اساس و با مراجعه به جدول ۵ مشاهده می‌گردد بزرگترین ضریب فیشر به پارامتر جریان اختصاص داشته و بنابراین موثرترین پارامتر در تعیین مقدار تخلخل است.

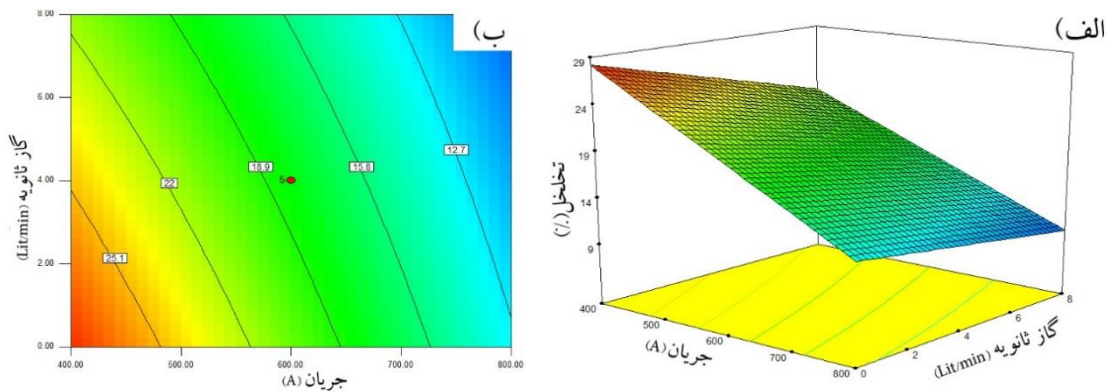
با افزایش مقدار گاز ثانویه مقدار تخلخل کاهش می‌یابد. با افزایش مقدار گاز ثانویه، آنتالپی جت پلاسمای نیز افزایش و

به تبع آن توان پلاسمای افزایش می‌یابد [۱۳]. با افزایش توان پلاسمای مقدار ذوب افزایش یافته و همانطور که قبلاً ذکر شد مقدار تخلخل کاهش می‌یابد. اما به هر حال با توجه به مقدار ضریب فیشر گاز ثانویه و شیب خط نمودار مربوط به آن در شکل ۴، مشاهده می‌شود که تأثیر مقدار جریان بر مقدار تخلخل به مراتب از تأثیر گاز ثانویه بیشتر است. با توجه به موثر بودن اندرکنش جریان و گاز ثانویه نمودارهای تغییرات هم‌زمان جریان و نرخ گاز ثانویه نیز در شکل ۵ (الف و ب) آورده شده است. در این نمودارها نیز کاهش مقدار تخلخل با افزایش مقدار گاز ثانویه و مقدار جریان به وضوح دیده می‌شود. علاوه بر این تأثیر بیشتر پارامتر جریان نسبت به گاز ثانویه بر مقدار تخلخل در شکل ۵-الف نیز قابل مشاهده است.



شکل ۴. چگونگی تغییرات مقدار تخلخل با پارامترهای پاشش.

همانطور که قبلاً ذکر شد با افزایش نرخ گاز اولیه، مقدار تخلخل افزایش می‌یابد. با افزایش نرخ گاز اولیه سرعت ذرات درون پلاسمای افزایش یافته و بنابراین زمان توقف ذرات درون پلاسمای کاهش می‌یابد [۱۹]. با کاهش زمان توقف ذرات درون پلاسمای مقدار ذوب کاهش یافته و بنابراین مقدار تخلخل افزایش می‌یابد. با توجه به ضریب فیشر موجود در جدول ۵، نرخ گاز اولیه کمترین تأثیر را بر روی مقدار تخلخل داشته و بنابراین برای دستیابی به مقادیر پایین تخلخل، افزایش مقدار جریان و گاز ثانویه بر کاهش نرخ گاز اولیه ارجحیت دارد. علاوه بر این در برخی پژوهش‌های



شکل ۵. الف) نمودار سه بعدی و ب) نمودار منحنی خطوط هم پاسخ (کانتور) برای تأثیر همزمان گاز ثانویه و جریان بر مقدار تخلخل.

۴) مقدار تخلخل با افزایش مقدار جریان و نرخ گاز ثانویه کاهش و با افزایش نرخ گاز اولیه افزایش می‌یابد.
 ۵) مقدار تخلخل اندازه‌گیری شده با تصاویر میکروسکوپ نوری در همه موارد از مقدار تخلخل اندازه‌گیری شده با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، بیشتر است.

انجام گرفته توسط سایر محققان، افزایش مقدار تخلخل با کاهش بیش از حد نرخ گاز اولیه گزارش شده است. با کاهش بیش از حد نرخ گاز اولیه هر چند سرعت ذرات کاهش می‌یابد اما طول ستون پلازما نیز کاهش یافته و بنابراین مقدار ذوب کاهش می‌یابد [۱۶].

مراجع

- [1] R.E. Johnston, *Mechanical characterisation of AlSi-hBN, NiCrAl-Bentonite, and NiCrAl - Bentonite-hBN freestanding abrasible coatings*, Surface & Coatings Technology, 205(2011)3268–73.
- [2] D. Sporer, S. Wilson and M. Dorfman, *Ceramics for Abradable Shroud Seal Applications*, 33rd International Conference on Advanced Ceramics and Composites, January (2009)
- [3] R. Rajendran, *Gas turbine coatings– An overview*, Engineering Failure Analysis, 26(2012)355–69.
- [4] M. Yi, J. He, B. Huang, H. Zhou, *Friction and wear behaviour and abrasibility of abrasible seal coating*, Wear, 231(1999)47–53.
- [5] C. Xu, L. Du, B. Yang, W. Zhang, *Study on salt spray corrosion of Ni-graphite abrasible coating with 80Ni20Al and 96NiCr-4Al as*

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر پارامترهای پاشش حرارتی پلاسمایی بر مقدار تخلخل در پوشش YSZ-10%LaPO₄ با استفاده از روش طراحی آزمایش فول فاکتوریل و بکارگیری روش سطح پاسخ بررسی شد. در این راستا سه پارامتر جریان، نرخ گاز اولیه و نرخ گاز ثانویه به عنوان پارامترهای متغیر در دو سطح (۱ و -۱) انتخاب شده و نقطه مرکزی (۰) نیز با ۵ تکرار انجام شد که نتایج زیر را به همراه داشت:

۱) مدل آماری با دقت بالایی به منظور پیش‌بینی مقدار تخلخل با استفاده از پارامترهای پاشش حرارتی توسعه یافت.

۲) مقدار تخلخل تابع هر سه پارامتر جریان، نرخ گاز اولیه و نرخ گاز ثانویه است.

۳) مقدار جریان بیشترین تأثیر و نرخ گاز اولیه کمترین تأثیر را بر روی مقدار تخلخل دارند.

- bonding layers*, Surface & Coatings Technology, 205(2011)4154–61.
- [6] YI. Maozhong, H. Baiyun, H. Jiawen, *Erosion, wear behaviour and model of abradable seal coating*, Wear, 252(2002)9–15.
- [7] S. Ebert, R. Mucke, D. Mack, R. Vaben, D. Stover, T. Wobst, S. Gebhard, *Failure mechanisms of magnesia alumina spinel abradable coatings under thermal cyclic loading*, the European Ceramic Society, 33(2013)3335–3343.
- [8] U. Bardi, C. Giolli, A. Scrivani, G. Rizzi, F. Borgioli, A. Fossati, K. Partes, T. Seefeld, D. Sporer and A. Refke, *Development and Investigation on New Composite and Ceramic Coatings as Possible Abradable Seals*, Thermal Spray Technology, 17(2008)805-11.
- [9] X. Ren, S. Guo, M. Zhao, W. Pan, *Thermal conductivity and mechanical properties of YSZ/LaPO4 composites*, Materials Science, 49(2014)2243–51.
- [10] S.M. Forghani, M.J. Ghazali, A. Muchtar, A.R. Daud, N.H.N. Yusoffc, C.H. Azhari, *Effects of plasma spray parameters on TiO₂ - coated mild steel using design of experiment (DoE) approach*, Ceramics International, 39(2013)3121–7.
- [11] D. Thirumalaikumarasamy, K. Shanmugama, V. Balasubramanian, *Influences of atmospheric plasma spraying parameters on the porosity level of alumina coating on AZ31B magnesium alloy using response surface methodology*, Progress in Natural Science, 22(2012)468–79.
- [12] S. Guessasma, C. Coddet, *Neural computation applied to APS spray process: porosity analysis*, Surface and Coatings Technology, 197(2005)85–92.
- [13] A. Scrivani, G. Rizzi, C.C. Berndt, *Enhanced thick thermal barrier coatings that exhibit varying porosity*, Materials Science and Engineering A, 476(2008)1–7.
- [14] R. Kingswell, K.T. Scott and L.L. Wassell, *Optimizing the Vacuum Plasma Spray Deposition of Metal*, Ceramic and Cermet Coatings Using Designed Experiments, Thermal Spray Technology, 2(1993)179-86.
- [15] Y. Wang and T.W. Coyle, *Optimization of Solution Precursor Plasma Spray Process by Statistical Design of Experiment*, Thermal Spray Technology, 17(2008)692-9.
- [16] C.S. Ramachandran, V. Balasubramanian, and P.V. Ananthapadmanabhan, *Multiobjective Optimization of Atmospheric Plasma Spray Process Parameters to Deposit Ytria-Stabilized Zirconia Coatings Using Response Surface Methodology*, Thermal Spray Technology, 20(2011)590-607.
- [17] S. Karthikeyan, V. Balasubramanian, R. Rajendran, *Developing empirical relationships to estimate porosity and microhardness of plasma-sprayed YSZ coatings*, Ceramics International, 40(2014)3171–83.
- [18] T. Troczynski and M. Plamondon, *Response Surface Methodology for Optimization of Plasma Spraying*, Thermal Spray Technology, 4(1992)293-300.
- [19] T. Steinke, G. Mauer, R. Vaben, D. Stover, D. R. Fagaraseanu and M. Hancock, *Process Design and Monitoring for Plasma Sprayed Abradable Coatings*, Thermal Spray Technology, 19(2010)756-64.
- [20] F. Madadi, F. Ashrafzadeh, M. Shamanian, *Optimization of pulsed TIG cladding process of stellite alloy on carbon steel using RSM*, Alloys and Compounds, 510(2012)71-7.