

No. 15-F-AAA-0000

بررسی چالش های اجرایی پوششهای نانوساختار به روش پاشش پلاسمایی سد حرارتی

محمد جزینی باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند دماوند، ایران smartgridblackbox@gmail.com

دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، ایران

محسن رفيعي

وزارت نیرو، شرکت برق منطقه ای تهران تهران، ایران

مسعود سرپاک

مهدى جزيني

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان دانشگاه آزاد اسلامی واحد بروجرد بروجرد، ایران

> محمد حسن زاده سبلویی دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، ایران

۱. مقدمه

خواص بهبودیافته این پوشش ها به واسطه بهبود ساختار حاصل شده است. میکروساختار و خواص پوشش های پاشش پلاسمایی به پارامترهای فرآیندی متفاوتی مرتبط میباشند و به صورت قابل توجهی وابسته به ویژگی های پودر تزریق شده هستند؛ پودرهای نانوساختار به وضوح راندمان رسوب دهی، استحکام چسبندگی و سختی پوشش ها را بهبود می دهند. نانوذرات به صورت مجزا بسیار ریز هستند و امکان استفاده از آنها برای پاشش پلاسمایی وجود ندارد و لذا در این شرایط بایستی پیش از پاشش ذرات ریز پراکنده تا ابعادی در حدود ۱۰۰-۳۰ میکرومتر آگلومره شوند. میکروساختار، چگالی و اندازه دانه پودرها تعیین کننده کیفیت پوشش حاصله است. چکیده — از سال ۱۹۹۰ میلادی پوششهای نانوساختار به دلیل هدایت حرارتی کم، ضریب انبساط حرارتی بالا و خواص مکانیکی عالی به عنوان یک زمینه تحقیقاتی مهم مطرح می باشد و مورد بررسی قرار می گیرند. پودرهای نانوساختار به وضوح راندمان رسوبدهی، استحکام چسبندگی و سختی پوششها را بهبود می-دهند. نانوذرات به صورت مجزا بسیار ریز هستند و امکان استفاده از آنها برای پاشش پلاسمایی وجود ندارد و لذا در این شرایط بایستی پیشاز پاشش ذرات ریز پراکنده تا ابعادی در حدود ۱۰۰-پودرها تعیین کننده کیفیت پوشش حاصله است.

واژه های کلیدی — پوشش های نانوساختار ؛ پاشش پلاسمایی ؛ تخلخل؛ سرامیک؛

ازاینرو، استحاله فاز پوششهای زیرکونیای پاششی در شرایط سرویس به عنوان یک پارامتر دارای اهمیت در دوام پوششها شناخته میشود [۸]. به صورت کلی میتوان استفاده از نانوپودرهای آگلومره شده، پاشش پلاسمایی سوسپانسیونی و پاشش پلاسمایی محلول پیش-ماده را به عنوان سه روش مورد استفاده جهت دستیابی به پوششهای سد حرارتی نانوساختار معرفی کرد. در ادامه ضمن معرفی این فرآیند-ها به بررسی برخیاز تحقیقات صورت گرفته در این زمینهها می-پردازیم.

۲-۲ پاشش حرارتی پودرهای نانوساختار آگلومره شده

پودرهای نانوابعاد به علت جریان پذیری پایین، لولههای انتقال در مسیر تغذیه کنند، پودر به مشعل پاشش حرارتی را مسدود می کنند و لذا نمی توانند به صورت مستقیم در فرآیند پاشش پلاسمایی مورد استفاده قرار گیرند. نفوذ به داخل جت پلاسما و رسیدن به سطح زیرلایه برای ذرات بسیار ریز و سبک در مقایسه با ذرات درشت بسیار دشوار است، این امر باعث قرار گرفتن ذرات در نواحی بیرونی و سردتر پلاسما و درنتیجه عدم مشارکت در تشکیل ریزساختار و کاهش بازده رسوبدهی می گردد.

اگرچه برای رفع این مشکل میتوان از گازهای حامل با نرخ شارش بالاتر استفاده کرد اما به جهت ایجاد ناپایداری و سرمایش شدید جت پلاسما، این روش عملی نخواهد بود. ازطرف دیگر ذرات بسیار ریز اینرسی پایینی را برای برخورد و نفوذ به داخل ناهمواری-های سطحی زیرلایه نشان میدهند و لذا پوشش حاصل از آنها از چسبندگی و کیفیت مناسبی برخوردار نخواهد بود. برای رفع این مشکل نانو ذرات تهیه شده به پودرهایی با اندازه میکرونی اگلومره میشوند [۳].

بهطور معمول برای دستیابی به خوراک های نانوساختار سرامیکی که در فرآیند پاشش پلاسمایی مورد استفاده قرار گیرند (ذرات آگلومره یا دانهها) از فرآیندهای خشککردن پاششی و سلژل استفاده میشود. در این بین روش خشک کردن پاششی به واسطه دستیابی به پودرهای کروی و سیالیت بیشتر مناسبتر به نظر میرسد [۹]

۳–۲–۱ فرآیند خشک کردن پاششی (

خشک کردن پاششی فرآیندی است که به کمک آن یک ماده تزریق شده سیال بوسیله پاشش به درون محیط داغ به پودر تبدیل می-شود. موادی که به عنوان خوراک در این روش مورد استفاده قرار می-گیرند، یا سوسپانسیونهای پایه آبی به همراه هوا بهعنوان گاز خشک کننده هستند و یا اینکه سوسپانسیونهایی بر پایه حلالهای آلی (معمولا اتانول) میباشند که از نیتروژن به عنوان گاز خشک کننده استفاده میکنند. روش خشک کردن پاششی برای سرامیکها توسط لوکاسیویز ^۲ مورد بحث قرار گرفته است [۸]. خشک کردن پاششی یک فرآیند پیچیده است، اما میتوان مطابق با آنچه که در شکل ۳–۱ مشاهده میشود یک پروسه چهار مرحلهای را برای

الف) شکل گیری قطرات،

- ب) تبخیر و بالونینگ،
 - ج) انفجار
- د) شکل گیری ذرات.

هنگامی که سوسپانسیون به درون محفظه خشککن پمپ می-شود، به واسطه فشار ناشی از گاز تزریق شده به سرعت از هم جدا شده و به قطرات ریز تبدیل میگردد. سپس، قطرات به دلیل تبخیر سریع حلال منقبض میشوند. درهنگام فرآیند، انتقال مایع از داخل به خارج از قطرات و تشکیل ذرات جامد به صورت همزمان انجام می-گیرد.

هنگامی که نرخ تبخیر درون قطرات از نرخ نفوذ از طریق سطح قطرات بیشتر باشد، در قسمت داخلی قطره حفرهای تشکیل خواهد شد. وقتی که فشار داخلی قطرات به یک میزان بحرانی می رسد، انفجار اجتناب ناپذیر است. در گام بعدی، ذرات با از دست دادن حلال و افزوده شدن چسبهای آلی به حالت پلاستیکی تبدیل خواهند شد. قطرات پلاستیک مانند به صورت پیوسته به دلیل تاثیر کشش سطحی و تا خشک شدن کامل منقبض می شوند. اندازه ذرات عمدتا در گام سوم و هنگامی که بیشتر حلال از دست رفته و پوستهای نرم تشکیل شده است اندازه گیری می شود [۸].

- 1 .Spray-drying process
- 2 .Lukasiewicz

بررسی چالش های اجرایی پوشش های نانوساختار به روش پاشش پلاسمایی سد حرارتی سومین کنفرانس تخصصی فناوری نانو در صنعت برق و انرژی – ۱۳۹۴ تهران، ایران

> محققان^۳ اقدام به آمادهسازی دانههای YSZ نانوساختار با استفاده از روش خشک کردن پاششی کردند. در این مطالعه به منظور درک تاثیر غلظت عامل اتصال دهنده بر مورفولوژی دانههای تهیه شده، از تصاویر FESEM مربوط به پودرهای حاصل از سوسپانسیونهای با درصدهای متفاوت از عامل اتصال دهنده استفاده شد (شکل ۳-۲). ه(شکل ۳-۲) مورفولوژی ذرات حاصل از سوسپانسیون YSZ بدون عامل اتصال دهنده پس از انجام فرآیند خشک کردن پاششی را نشان می دهد.

> همانطور که در تصویر مشخص است، دانهها در این حالت توخالی هستند. از طرف دیگر شاهد حضور تعداد زیادی ذرات غیر کروی در این شرایط هستیم. بیشتر دانههای حاصل از آگلومره کردن نانوپودرهای YSZ به روش خشک کردن پاششی، مورفولوژی عمدتا نیمهکروی با سطوحی صاف را نمایش میدهند (b-d(شکل ۳-۲)).

> با این حال، استفاده از ۱۵ درصدوزنی عامل چسبنده شرایط همگنتری را ایجاد کرده و دانهها از ظاهر کرویتر و ابعاد یکسانتری برخوردارند. بهعلاوه، برخی از دانههای تغییر شکل یافته و با حضور وجوح بزرگ، در نمونههای با ۱۵ درصد وزنی عامل اتصال دهنده آشکار است (b(شکل ۳–۲)).

> این ناهمگنی را میتوان به تفکیک فاز مذاب در حین عملیات خشک کردن پاششی، به علت برخی از کششهای سطحی قرارگرفته در سوسپانسیون نسبت داد [۹].



شکل ۳–۱ فرآیند پاشش خشک سرامیکها [۸].



شکل ۳-۲ تصاویر میکروسکوپی FESEM از پودرهای حاصل از خشک شدن پاششی و متشکل از مقادیر متفاوت از عامل اتصال دهنده (wt%). (a) ۰. (b) ۵. (c) ۱۰. (d) ۱۵ [P].

۳–۲–۲ ترکیب فاز و میکروساختار پوششهای سدحرارتی نانوساختار پاششی

زنگ^۴ و همکارانش به بررسی پوششهای پاشش پلاسمایی از زیرکونیای نانوساختار پرداختند [۱۰]. در این مطالعه به منظور شناسایی فاز و تعیین اندازه دانه، الگوی دیفراکسیون مربوط به

محمدرضا لقمان¬استیکی و همکارانش

4. Yi Zeng

پودرهای اولیه و پوشش ایجاد شده بدست آمد و با استفاده از معادله شرر ۵متوسط اندازهدانه فاز زمینه تخمین زده شد.

 $B_{b} (2\theta) = 0.9 \lambda / (D \cos(\theta)) \qquad (1-\tau)$

در رابطه مذکور D ابعاد میانگین کریستالیت، (B_b(20 پهنای پیک در نصف ارتفاع ماکزیمم و نیز (λ(۰.۱۴۵ nm و0، بترتیب دلالت بر طولموج اشعه ایکس و زاویه تفرق براگ دارند.

شکل ۳-۳ الگوهای دیفراکسیون اشعه ایکس مربوط به پودر و پوشش را پس از پاشش نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، هیچ فاز جدید و نیز تفاوت آشکاری در شدت پیکهای مربوط به پودر و پوشش در الگوی دیفراکسیون مربوط به آنها مشاهده نمی شود. پودر و پوشش هردو ترکیبیی از تتراگونال زیرکونیای خالص هستند، که فاز تعادلی در دمای متوسط می باشد. اگرچه، الگوی اشعه ایکس مربوط به پوشش نسبت به پودر از دو پیک بیشتر برخوردار است؛

این امر اشاره به این نکته دارد که پوشش از ساختار کریستالی بهتری نسبت به پودر برخوردار است. همانطور که میدانیم، انجماد سریع با نرخ سرمایشی در حدود ۱۰۶ درجه کلوین بر ثانیه در فرآیند پاشش پلاسمایی قابل دستیابی است، و منجربه ساختار دانه ریزی از رسوبات میگردد. بدیهی است که پیکهای XRD مربوط به پوشش در مقایسه با پیکهای مربوط به پودرهای اولیه باریکتر هستند، که نشان دهنده رشد دانهها میباشد. با توجه به محاسبات صورت گرفته متوسط اندازه دانه پودرهای اولیه و پودر ایجاد شده بترتیب ۲۳ و ۸۹ نانومتر میباشد.

این نتیجه نشان میدهد که اگرچه رشد صورت گرفته است اما سرعت آن در جریان فرآیند پاشش پلاسمایی سریع نبوده و لذا پوشش کماکان نانوساختار باقی مانده است [۱۰].



شکل ۳-۳ الگوهای اشعه ایکس مربوط به a) پودر ZrO₂ اولیه و b) پوشش ZrO₂ پاششی [۱۰].

ناوانگ² و همکارانش ضمن بررسی پوششهای پاشش پلاسمایی از زیرکونیای نانوساختار، به بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر مورفولوژی پوشش ایجاد شده پرداختند [۱۱]. شکل ۳–۴ میکروساختار پوشش زیرکونیایی نانوساختار در سطح مقطع شکست را نشان میدهد. همانطور که از این تصویر مشخص است، دو نوع ساختار در پوشش وجود دارد: فاز پیوسته مذاب و میکروساختار سست (بیقاعده).

میتوان مشاهده کرد که ساختار بسیار سست میباشد، و میکروحفرات موجود در بین ذرات میکرونی اندازهای معادل با نانوذرات دارند. این نوع ساختار خواص عایق حرارتی پوششهای سدحرارتی را افزایش خواهد داد.

جزییاتی از خصوصیات میکروساختاری قبل و پس از انجام عملیات آنیل به کمک تصاویر میکروسکپ الکترونی روبشی از سطح پوشش رویی مورد بررسی قرار گرفت.

شکل ۳– ۵ مورفولوژی پوششهای زیرکونیایی نانوساختار در حالت پساز پاشش و بعد از ۱۵ ساعت عملیات حرارتی در دماهای متفاوت را نشان میدهد. همانطور که مشخص است میکروساختار پساز پاشش متشکلاز نانوپودرها و میکروحفراتی در بین نانوپودرها میباشد. اندازه نانوپودرها پساز آنیل در دماهای متفاوت برای مدت زمان ۱۵ ساعت افزایش یافته است [۱۱].

5. Scherrer

6. Na Wang

بررسی چالش های اجرایی پوشش های نانوساختار به روش پاشش پلاسمایی سد حرارتی سومین کنفرانس تخصصی فناوری نانو در صنعت برق و انرژی – ۱۳۹۴ تهران، ایران



شکل ۳-۴ تصویر SEM از پوشش زیرکونیای پس از پاشش [۱۱].

در پژوهشی دیگر هانگزو^۷ به همراه همکارانش با ایجاد نمونه-های ایستاده آزاد از طریق حذف زیرلایه به کمک محلول اسید هیدروکلریک و اندازه گیری میزان حفرات این نمونهها به کمک روش نفوذ جیوه[^]، به بررسی توزیع اندازه حفرات در پوششهای سدحرارتی نانوساختار پاشش پلاسمایی پرداختند [۱۲].

تخلخلهای سطحی و پیوسته اندازهگیری شده از پوشش زیرکونیایی نانوساختار ۱۳ درصد و متوسط قطر حفرات ۱۳۵۲۴ میکرومتر است.

شکل a(۳–۶) توزیع تجمعی تخلخلهای پوشش بوسیله تخلخل-سنج نفوذی جیوه را نشان میدهد.

شکل b(۳–۶) ترکیب تخلخلها براساس نتایج حاصل از اندازه-گیری تخلخلها در شکل a(۳–۶) را تشریح میکند.

نتایج حاصل یک توزیع اندازه حفره دونمایه، شبیه به آنچه که در پوششهای زیرکونیای مرسوم مشاهده می شود را نشان می دهند. میکرو حفرات در مقایسه با حفرات در ابعاد ماکرو مشارکت بیشتری در تخلخل کلی دارند. تخلخلهای ظریف با قطری کمتر از یک میکرومتر، حاوی میکروترکهای درون اسپلت، شکافهای بین اسپلتی ناشی از چسبندگی کم و حفرات کو چک حاصل از ذرات ذوب نشده هستند.

یک موضع از میکروحفرات یا عیوب بزرگ با اندازه حتی تا ۱۰۰ میکرومتر در پوشش حضور دارند، که میتوانند منتسب به ماکروحفراتی نظیر ترکهای شاخهای، حفرات بینلایهای ناشی از چسبندگی نامناسب و حفرات کروی حاصل از گازهای حبس شده باشند. میزان تخلخل پوشش به صورت قابل توجهی به شرایط پاشش

7. Hong Zhou

8. Mercury intrusion

نظیر اندازه پودرها، فاصله پاشش، زاویه پاشش و ... وابسته است. تا حدودی، پودرهای ذوب نشده در پوشش نانوساختار به افزایش تعداد میکروحفرات کمک میکند [۱۲].



شکل ۳- ۵ مورفولوژی سطح پوشش های نانو YSZ در دماهای متفاوت پس از عملیات حرارتی برای مدت ۱۵ ساعت: a) حالت پس از پاشش b) یسی (d) ۵۰۰^{°C} (c) ۲۰۰۰^{°C} (c) ۲۰۰۰^{°C} (c) ۲۰۰^{°C} (c)



شکل ۳-8 a) توزیع تخلخل از پوشش زیرکونیای نانوساختار پساز پاشش و b) ترکیب کل تخلخلها [۱۲].

۳-۲-۳ خواص مکانیکی

لیما^۴ و همکارانش در پژوهشی، به ارزیابی میکروسختی و مدول الاستیک پوششهای زیرکونیایی نانوساختار پاشش حرارتی پرداختند [۱۳]. برای این منظور آنها پودر آزمایشگاهی نانوساختار زیرکونیای به صورت جزیی پایدار شده با ایتریا را به کمک فرآیند

9. Lima

سومین کنفرانس تخصصی فناوری نانو در صنعت برق و انرژی – ۱۳۹۴ تهران، ایران

پاشش پلاسمایی و با اعمال پارامترهای متفاوت پاشش که در جدول ۳-۱ نشان داده شدهاند، برروی زیرلایه فولادی رسوب دادند.

میکروسختی ویکرز اندازهگیری شده برروی سطح مقطع و سطح بالایی و با بار اعمالی معادل g 1000 در شکل ۳– ۷ نشان داده شده است. مقادیر اندازهگیری شده مربوط به سطح بالایی اندکی کمتر از مقادیر اندازهگیری شده مربوط به سطح مقطع هستند. مقادیر میکروسختی Knoop اندازهگیری شده با استفاده از بار اعمالی 1000g بر سطح مقطع در شکل ۳– ۸ ارائه شده است.

مقادیر Knoop نسبت به مقادیر ویکرز تحت بار یکسان کمتر هستند. به علاوه اختلاف در مقادیر knoop نسبت به مقادیر ویکرز بیشتر میباشد. هردوی این عوامل نسبتا مرتبط با تفاوت در هندسه فروروندهها هستند که نیروهای متفاوتی را در زمینه پوشش ایجاد می-کنند.

Parameters	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 6
Power (kW)	40	40	40	40	32	24
Current (A)	800	800	800	800	800	600
Voltage (V)	50	50	50	50	40	40
Ar flow plasma (slpm)	48	38	48	38	48	48
H ₂ flow plasma (slpm)	5	5	5	5	4	4
Ar flow carrier gas (slpm)	5	5	5	5	5	5
RPM-Hopper (%)	30	30	30	30	30	30
Spray distance (cm)	6	6	8	8	8	8

جدول ۳–۱ پارامترهای پاشش مورد استفاده برای پوششهای PSZ [۱۳]

با مشاهدهی شکلهای ۳–۷ و ۳–۸ میتوان نتایجی که در ادامه بیان میشوند را استخراج کرد. در محور Ra از چپ به راست، از پارامترهای پاشش ۱ به ۶، توان مشعل کاهشی و فاصله پاشش افزایشی میباشد. با کاهش توان مشعل پلاسما و دمای ذرات، سرعت آنها تمایل به قطره شدن خواهد داشت و از پخش بیشتر قطرات پاشیده شده ممانعت خواهد کرد.







شکل ۳– ۸ ارتباط میکروسختی Knoop – زبری (بار 1000g) برای حالتهای متفاوت پارامترهای پاشش (جدول ۳–۱) [۱۳].

مقادیر مدول الاستیک و ارتباط آن با زبری در شکل ۳-۹ نشان داده شده است. باز هم همان روند مشاهده می شود: پوشش صافتر، از میکروسختی Knoop و مدول الاستیک بیشتر برخوردار می باشد؛ خط چین در شکلهای رسم شده برای درک بهتر این روند مشاهده می-شود. مدول الاستیک در پارامترهای پاشش ۱ به ۴ اندکی تغییر کرده، جایی که توان پلاسما یکسان برای نرخهای H2/Ar متفاوت و تفاوت مدول الاستیک اندازه گیری شده بوششهای SZ به کمک آزمون خمش چهار نقطه است، و نشان می دهد که پوششهای SZ تغییر قابل توجهی را در میزان مدول الاستیک در نتیجه تغییر فاصله پاشش در دو سانتی متر ضمن توان پلاسما یکسان ارائه نمی دهند [۱۳]. بررسی چالش های اجرایی پوشش های نانوساختار به روش پاشش پلاسمایی سد حرارتی

سومین کنفرانس تخصصی فناوری نانو در صنعت برق و انرژی – ۱۳۹۴ تهران، ایران



شکل ۳–۹ ارتباط مدول الاستیک – زبری (بار 1000g) برای حالتهای متفاوت پارامترهای پاشش [۱۳].

شکل ۳-۱۰ ضریب انبساط حرارتی پوشش زیرکونیای نانوساختار را نشان می دهد. میانگین ضریب انبساط حرارتی پوشش-های زیرکونیایی در چرخه حرارتی اولیه و چرخه حرارتی ثانویه از دمای اتاق تا دمای ² ۲۰۰۰ بترتیب ۱۱/۰ و ^{Cl ۲} ۶-۱۰ * ۱۱/۶ می-باشد. ضریب انبساط حرارتی پوشش زیرکونیایی، ابتدا افزایش می یابد و سپس از دمای اتاق تا ² ۲۰۰۰ در چرخه حرارتی اول افزایش می یابد. این رفتار به پدیده از دست دادن اکسیژن در پوششهای سرامیکی ایجاد شده از طریق فرآیند پاشش پلاسمایی اتمسفری نسبت داده شده است.

هنگامیکه پوشش زیرکونیایی پس از پاشش و در شرایط اتمسفری تحت حرارت قرار می گیرد، اتمهای اکسیژن مجددا به تهی-جاهای پوشش افزوده می شوند. این پدیده در چرخه حرارتی ثانویه ناپدید می شود. در حین چرخه حرارتی ثانویه، ضریب انبساط حرارتی به صورت خطی با دما افزایش می یابد [۸].



شكل ٣-١١ ضريب انبساط حرارتي پوشش نانوساختار زيركونيم [٨].

نتيجه گيري:

پودرهای نانوساختار به وضوح راندمان رسوبدهی، استحکام چسبندگی و سختی پوششها را بهبود میدهند. نانوذرات به صورت مجزا بسیار ریز هستند و امکان استفاده از آنها برای پاشش پلاسمایی وجود ندارد و لذا در این شرایط بایستی پیشاز پاشش ذرات ریز پراکنده تا ابعادی در حدود ۱۰۰–۳۰ میکرومتر آگلومره شوند. میکروساختار، چگالی و اندازهدانه پودرها تعیینکننده کیفیت پوشش حاصله است.

منابع:

[۱] جسین جمالی، راحله احمدی پیمانی، رضا مظفری⁻نیا، شجاع رضوی ,پوشش های سد حرارتی .دانشگاه صنعتی مالک اشتر, ۱۳۹۳.

- [Y] Y. Zhao, "Evaluation and characterisation of thermal barrier coatings," phd thesis, University of Manchester, 2013.
- [r] G. Mauer, M. O. Jarligo, D. E. Mack, and R. Vaßen, "Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings: New Materials, Processing Issues, and Solutions," J. Therm. Spray Technol., vol. 22, no. 5, pp. 646–658, Feb. 2013.
- [*] H. X. and H. Guo, Thermal barrier coatings. Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [a] G. Mauer, D. Sebold, R. Vaßen, and D. Stöver, "Improving Atmospheric Plasma Spraying of Zirconate Thermal Barrier Coatings Based on Particle Diagnostics," J. Therm. Spray Technol., vol. 21, no. 3–4, pp. 363–371, Nov. 2011.

بررسی چالش های اجرایی پوشش های نانوساختار به روش پاشش پلاسمایی سد حرارتی

سومین کنفرانس تخصصی فناوری نانو در صنعت برق و انرژی – ۱۳۹۴ تهران، ایران

- [۶] M. O. Jarligo, D. E. Mack, G. Mauer, R. Vaßen, and D. Stöver, "Atmospheric Plasma Spraying of High Melting Temperature Complex Perovskites for TBC Application," J. Therm. Spray Technol., vol. 19, no. 1–2, pp. 303–310, Aug. 2009.
- [v] M. O. Jarligo, G. Mauer, D. E. Mack, R. Vaßen, and D. Sto, "The Influence of Titania Doping on Plasma-Sprayed YSZ Thermal Barrier Coatings," in Coatings Proceedings of the 25th International Conference on Surface Modification Technologies (SMT 25), 2012, vol. 2011, no. Smt 25.