



بررسی روش‌های ارزیابی پوشش سد حرارتی با استفاده از روش‌های غیر مخرب

فصلنامه
سرامیک ایران

مجید میرزایی*؛ اشکان ذوالریاستین

عضو هیات علمی گروه پژوهشی مواد غیرفلزی (استادیار)، پژوهشگاه نیرو، تهران

چکیده: تمرکز اصلی این مقاله مروری به روش‌های بررسی غیرمخرب مورد استفاده برای ارزیابی پوشش‌های پاشش حرارتی مربوط می‌شود. این روش‌ها شامل جریان‌های گردابی، تصویربرداری مادون قرمز، فاز طیف‌سنجی انتشار حرارتی، روش‌های آکوستیک، فوتوآکوستیک، انعکاس مادون قرمز میانی، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشمیایی، پیزوویف‌سنجی فوتولومینسانس و روش‌های تداخل‌سنجی است. این روش‌ها برای شناسایی عیوب سطوح و فصل مشترک بین لایه‌های سرامیکی و باند فلزی، شکل، اندازه و محل آن و اندازه‌گیری تخلخل و ضخامت استفاده شده است.

کلمات کلیدی: پوشش سد حرارتی، زیرکونیوم پایدار شده با ایتریا، آزمون‌های غیرمخرب.



نویسنده مسئول و نویسنده اول:

دکتر مجید میرزایی

پژوهشگاه نیرو

نوع مقاله: پژوهشی

صفحه‌های: ۵۰ تا ۶۳

شاپا چاپی: ۳۳۵۱-۱۷۳۵

شاپا الکترونیکی: ۳۰۹۷-۲۷۸۳

زبان نشریه: فارسی

دسترس پذیر در نشانی:

www.JICERS.ir

تاریخ دریافت:

۱۴۰۰/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۱۲/۲۴

mjmirzaei@nri.ac.ir

DOR: 20.1001.1.17353351.1401.18.0.5.1

۱- مقدمه

برای شناسایی و نظارت بر شکست TBC، تشخیص لایه‌لایه شدن^۱ آن‌ها، از روش‌های الکترومغناطیسی غیرمخرب (NDE) استفاده می‌شود [۱]. بسیاری از این‌ها بر اساس اصول نوری از جمله بازتاب مادون قرمز میانی [۲]، طیف‌سنجی لومینسانس [۳] و پراکندگی نوری الاستیک^۲ [۴] هستند. این روش‌ها امکان تشخیص لایه‌لایه شدن TBC و شرایط پیش از جدایش پوشش را فراهم می‌کند. طول عمر و عملکرد TBC در درجه اول به ویژگی‌های ریزساختاری لایه‌ها مانند مورفولوژی و غلظت منافذ و توزیع و تعداد ریز ترک‌ها بستگی دارد. طول عمر چنین پوشش‌هایی به تعدادی از پارامترها، مانند دما، درجه فرسایش و محیط در معرض سطح بستگی دارد [۵]. بنابراین، NDE فصل مشترک برای جلوگیری از عواقب فاجعه‌بار ضروری است. با این حال، ماهیت پیچیده سیستم TBC دارای تخلخل، ریزترک است و از مواد مختلفی تشکیل شده است، و این ویژگی‌ها مشکلاتی را ایجاد می‌کنند که برای توسعه یک روش NDE مناسب باید بر آن غلبه کرد [۶]. یک روش موثر NDE را می‌توان برای نظارت بر عملکرد سیستم TBC و ارائه

¹ Delamination

² Elastic optical scattering



یک پیش‌بینی مستمر طول عمر باقی‌مانده استفاده کرد. یک روش حسگر حرارتی NDE گزارش شده است که توانایی ارزیابی قابلیت اطمینان فرآیندهای پوشش جدید، شناسایی اجزای دارای نقص، نظارت بر نرخ تخریب در طول سرویس و ارائه داده‌ها برای تصمیم‌گیری در مورد تعویض/تعمیر قطعات را دارد [۷]. تکنیک‌های غیرمخرب قادر به انجام کنترل و بازرسی سرویس در حوزه‌های مختلف فیزیک کاربردی در حال توسعه هستند و به طور کلی به اندازه‌گیری ضخامت پوشش یا تشخیص و اندازه‌گیری عیوب پیوند می‌پردازند. در زمینه اولتراسونیک، برخی از تکنیک‌ها برای اندازه‌گیری ضخامت و ثابت‌های الاستیک، و همچنین برای تشخیص عیب پیوند و اندازه‌گیری توسعه داده شده‌اند. در آزمون‌های غیرمخرب، یک پالس اولتراسونیک، یا با فرکانس ثابت یا باند وسیع، توسط یک میدل پیزوالکتریک به سخت‌افزار وارد می‌شود که ممکن است به عنوان یک پروب آشکارساز نیز عمل کند. میدل کرنش‌های مکانیکی را به سیگنال الکتریکی و بالعکس تبدیل می‌کند. فرکانس اولتراسونیک، عموماً بیش از ۲۰ کیلوهرتز و معمولاً بین ۰/۱ تا ۲۵ مگاهرتز، به گونه‌ای است که امواج الاستیک در مواد جامد ایجاد می‌کند. امواج الاستیک در نمونه منتشر می‌شوند، به عیوب از جمله سطوح و فصل مشترک برخورد می‌کنند و تحت بازتابی قرار می‌گیرند که به عنوان پژواک شناخته می‌شود. کاوشگر تمام امواج را تشخیص می‌دهد و آن‌ها را روی یک اسیلوسکوپ به صورت طیفی از پژواک که در زمان‌های مختلف می‌رسد نمایش می‌دهد. تجزیه و تحلیل طیف نشان‌دهنده شکل، اندازه و محل عیوب است. بسته به ابعاد اسکن‌ها، روش ارزیابی به عنوان اسکن‌های UT (تست اولتراسونیک) A، B یا C UT تعیین می‌شود [۸]. اسکن UT A که معمولاً برای اندازه‌گیری ضخامت بر اساس سیگنال فرود و سیگنال منعکس شده از یک سطح موازی استفاده می‌شود، یک صفحه نمایش یک بعدی ارائه می‌دهد. اسکن B شامل مجموعه‌های موازی اسکن A است و اسکن UTC یک نمایش دو بعدی از توزیع عیوب را ارائه می‌دهد. اگر آشکارساز سیگنال ارسالی را در سمت دیگر نمونه ثبت کند، این فرآیند حالت "از طریق انتقال" نامیده می‌شود. از طرف دیگر، اگر آشکارساز در همان سمت میدل سیگنال منعکس شده را حس کند، فرآیند در حالت "پژواک پالس" است. هم حد تشخیص و هم عمق نفوذ (ضخامت نمونه‌ها) توسط فرکانس سیگنال اولتراسونیک کنترل می‌شود. روش اولتراسونیک NDI برای مواد فلزی، غیرفلزی، دی الکتریک، مغناطیسی و غیرمغناطیسی قابل استفاده است. برای اندازه‌گیری در دماهای بیش از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (۲۱۲ فارنهایت)، میدل‌های با قابلیت دمای بالا با مواد جفت‌کننده باید استفاده شوند تا از تماس میدل با سطوح داغ جلوگیری شود. خواص ارتجاعی مانند مدول الاستیسیته و نسبت پواسون مواد آزمایشی را نیز می‌توان با روش‌های اولتراسونیک از اندازه‌گیری سرعت امواج الاستیک تعیین کرد. ضخامت و خواص ارتجاعی پوشش‌های سرامیکی و فلزی توسط یک روش اصلاح‌شده اولتراسونیک NDI اندازه‌گیری شده است که امواج سطحی الاستیک، معروف به امواج ریلی، با میدل‌های تمرکز ویژه تهیه‌شده تولید می‌کند. ضخامت، چگالی پوشش و ریزسختی پوشش‌های پاشش حرارتی را می‌توان با روش اولتراسونیک NDE اندازه‌گیری یا تخمین زد. ضخامت با وارد کردن سیگنال اولتراسونیک به یک جزء پوشش داده شده از یک میدل اندازه‌گیری می‌شود. تأخیر زمانی بین سیگنال‌های منعکس شده از سطح پوشش و فصل مشترک پوشش - بستر روی نمایشگر CRT ثبت می‌شود. ضرب این تأخیر در سرعت صدا در پوشش، دو برابر ضخامت پوشش را به دست می‌دهد. یک روش اولتراسونیک با استفاده از سیگنال کنترل، به اصطلاح روش CS، با موفقیت بر روی پوشش فلزی پاشش حرارتی (فولاد ۰/۱٪ C) که روی بستر فولادی قرار گرفته است برای شناسایی عیوب پیوند و اندازه‌گیری تخلخل و ضخامت استفاده شده است [۸].

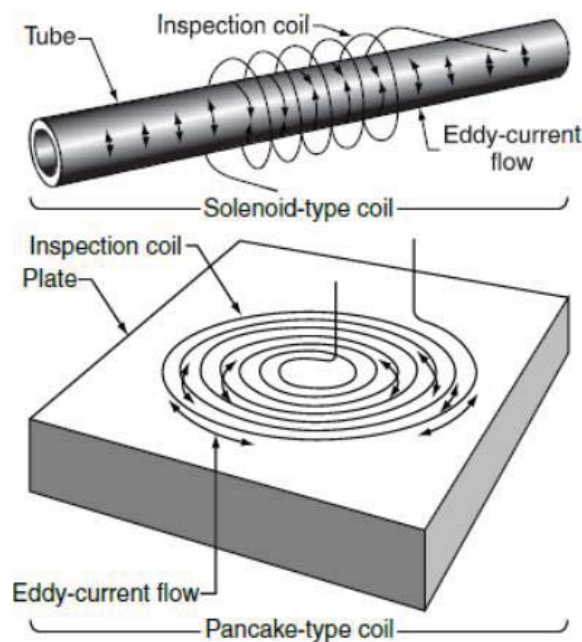
۲- روش‌های غیرمخرب

۲-۱- جریان‌های گردابی^۱

این روش فقط برای مواد رسانای الکتریکی قابل استفاده است. هنگامی که یک جریان الکتریکی متناوب از طریق سیم‌پیچی به نام "پروب" جریان می‌یابد، یک میدان مغناطیسی متناوب در امتداد محور سیم پیچ ایجاد می‌شود [۹، ۱۰]. اگر سیم پیچ در مجاورت یک سطح فلزی قرار گیرد به طوری که میدان‌های مغناطیسی سطح را قطع کنند، جریان‌های گردابی در فلز به شکل حلقه‌های

¹ Eddy Current

دایره‌ای ایجاد می‌شود (شکل ۱) این جریان‌ها میدان‌های مغناطیسی خود را ایجاد می‌کنند که تمایل دارند با میدان مغناطیسی اولیه سیم پیچ مخالفت کنند. نقص در فلز، از جمله تغییر ضخامت، باعث کاهش یا قطع جریان جریان‌های گردابی می‌شود که به نوبه خود باعث افزایش امپدانس سیم‌پیچ می‌شود. پروب با دریافت سیگنال الکتریکی که به صورت الکترونیکی با بالانس و دمولاسیون مناسب تقویت می‌شود، تغییر امپدانس را نظارت می‌کند. در نهایت بر روی صفحه نمایش کامپیوتر نمایش داده می‌شود. سیگنال‌های نمایش داده شده با سیگنال‌های تولید شده توسط استانداردهای مرجع از همان ماده با نقص‌ها و ترک‌های کنترل شده مقایسه می‌شوند. پاسخ جریان گردابی از یک فلز تحت تأثیر چندین پارامتر است که شامل رسانایی الکتریکی فلز و همچنین نفوذپذیری مغناطیسی آن، فرکانس جریان متناوب القایی، نزدیکی پروب به سطح و بالا آمدن آن می‌شود. آخرین پارامتر سیگنالی است که با حرکت پروب بر روی سطح یا خارج از سطح ایجاد می‌شود. یکی از تغییرات روشی که توضیح داده شد، روش جریان گردابی اسکن فرکانس است [۸].



شکل ۱: تولید جریان گردابی توسط جریان در دو نوع سیم‌پیچ [۸].

۲-۲- روش جریان گردابی اسکن فرکانس^۱ (FSECT)

روش جریان گردابی اسکن فرکانس (FSECT) گونه‌ای از فرآیندی است که قبلاً توضیح داده شد که در آن پروب جریان گردابی در محدوده فرکانس، معمولاً بین ۱۰۰ کیلوهرتز و ۱۰ مگاهرتز کار می‌کند [۱۱، ۱۲]. امپدانس به عنوان تابعی از فرکانس اندازه‌گیری می‌شود. کاربرد این روش برای پوشش‌ها در اندازه‌گیری ضخامت پوشش‌های ضدخراش بر روی پره‌های کمپرسور توربین گاز آلیاژی Ti6Al4V و پوشش‌های MCrAlY که بر روی پره‌های توربین ساخته شده از سوپرآلیاژهای پایه Ni IN 738 قرار گرفته‌اند نشان داده شده است. در مورد دوم، محتوای NiAl پوشش نیز از نسبت بین هدایت الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی به عنوان تابعی از قرار گرفتن در معرض موتور تعیین شد. FSECT با موفقیت در محل برای اندازه‌گیری ضخامت پوشش باقی‌مانده بر اساس محتوای فاز بر روی پره‌های توربین در معرض میدان از توربین‌های گاز صنعتی با اندازه فریم استفاده شده است. یکی دیگر از اصلاحات این روش شامل سنسورهای مگنتومتر سیم پیچی پیچ در پیچ چندفرکانسی جریان گردابی (MWM) است. سنسور MWM از یک سیم پیچ اولیه پر پیچ و خم تشکیل شده است که میدان مغناطیسی را ایجاد می‌کند و در طرف مقابل، یک سیم پیچ ثانویه پر پیچ و خم برای نظارت بر پاسخ. سنسورهای MWM بسیار قابل اعتماد و قابل تکرار هستند. قابلیت این روش در اندازه‌گیری

¹ Frequency Scanning Eddy Current Technique



ضخامت پوشش فلزی و سرامیکی تا ± 2 میلی‌متر، تعیین هدایت الکتریکی پوشش فلزی و زبری سطح نشان داده شده است [۱۳-۱۶].

۲-۳- تصویربرداری مادون قرمز^۱

تصویربرداری حرارتی، همچنین به عنوان تصویربرداری امواج حرارتی یا تصویربرداری مادون قرمز شناخته می‌شود، یک روش NDI بسیار جذاب برای مواد عایق حرارت است و برای نظارت بر تجمع آسیب در TBCها ارزیابی شده است [۱۷، ۱۸]. این روش مستلزم ایجاد یک گرادیان دما در سراسر نمونه پوشش داده شده با TBC است که در معرض قرار گرفتن در معرض حرارتی چرخه‌ای قبلی قرار گرفته و دمای سطح پوشش سرامیکی را با یک دوربین IR نظارت می‌کند. گرادیان دما ممکن است با قرار دادن نمونه چرخه حرارتی روی یک صفحه داغ به طوری که گرما در سراسر ضخامت جریان یابد، ایجاد شود. آسیب ایجاد شده در TBC به دلیل قرار گرفتن در معرض حرارتی چرخه‌ای عموماً شامل ریزترک‌ها است. این‌ها انتقال حرارت را به سطح کاهش می‌دهند که با ادامه چرخه حرارتی به تدریج سردتر به نظر می‌رسد [۱۹].

۲-۴- تصویربرداری مادون قرمز امواج حرارتی پالس-اکو^۲

گونه‌ای از روش تصویربرداری مادون قرمز، تصویربرداری امواج حرارتی پالس-اکوی مادون قرمز است [۱۱]. فرض اصلی فرآیند این است که نقص‌های ایجاد شده در یک TBC به صورت محلی هدایت حرارتی را تغییر می‌دهند. یک لامپ فلاش یک پالس گرما را به سطح نمونه پوشش داده شده با TBC ارسال می‌کند. نواحی دارای نقص‌های زمینه‌ای به دلیل اتلاف کندتر گرما توسط رسانش گرم‌تر به نظر می‌رسند. دما نیز به آرامی کاهش می‌یابد. یک دوربین IR متصل به کامپیوتر، توزیع دما را ترسیم می‌کند. تجزیه و تحلیل توزیع دما و زمان پوسیدگی اطلاعاتی در مورد جزئیات تجمع آسیب ارائه می‌دهد [۲۰]. این روش برای تشخیص انواع مختلف عیوب در حضور لایه‌لایه در سطح مشترک پوشش سرامیکی-باند یافت شده است. نمونه‌ای از ارزیابی آسیب TBC توسط روش تصویربرداری مادون قرمز امواج حرارتی پالس-اکوی توسط چن و همکاران شرح داده شده است. نمونه‌های پوشش داده شده با TBC، متشکل از سرامیک 8YSZ، که توسط EB-PVD بر روی سوپراآلیاژ تک‌کریستالی René N5 با پوشش پیوندی رسوب شده، در کوره‌ای بین ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد (۳۹۲ فارنهایت) و ۱۱۷۷ درجه سانتی‌گراد (۲۱۵۰ فارنهایت) چرخه حرارتی شدند. چرخه شامل ۹ دقیقه برای گرم کردن، ۴۵ دقیقه نگه داشتن در دمای بالا و ۱۰ دقیقه برای خنک شدن بود. هر دو تصویر موج حرارتی و پروفیل دمای سطح بر روی سطح TBC به عنوان تابعی از زمان اندازه‌گیری شدند. به تدریج، دامنه سیگنال حرارتی افزایش می‌یابد تا زمانی که TBC شکست بخورد. افزایش دامنه موج حرارتی به کاهش رسانایی حرارتی به دلیل تداوم تجمع آسیب نسبت داده می‌شود. کاهش بیش از هر گونه افزایش در هدایت حرارتی ناشی از زینترینگ سرامیکی را جبران می‌کند. داده‌ها نشان می‌دهد که این روش می‌تواند برای نظارت بر سلامت TBC در طول قرار گرفتن در معرض حرارت استفاده شود. تصویربرداری حرارتی نیز اغلب برای نظارت بر خوردگی و گسستگی در اجزای ساختاری استفاده می‌شود [۲۱-۲۳].

۲-۵- فاز طیف‌سنجی انتشار حرارتی^۳

این برای اندازه‌گیری خواص حرارتی TBCها و تشخیص لایه‌لایه شدن در سرامیک استفاده شده است [۲۴، ۲۵]. در هسته این روش یک پرتو لیزر مدوله شده به صورت دوره‌ای، مانند لیزر CO₂ (طول موج ۱۰/۶ میکرومتر) قرار دارد که TBC را گرم می‌کند. فرکانس مدولاسیون بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ هرتز است. فرکانس، عمق نفوذ حرارتی را تعیین می‌کند. روکش سرامیکی گرم شده تشعشع حرارتی ساطع می‌کند که توسط یک آشکارساز رهگیری می‌شود. آشکارساز تفاوت فاز بین سیگنال گرمایشی و سیگنال ساطع شده را اندازه‌گیری می‌کند. یک مدل ریاضی اختلاف فاز را به خواص حرارتی سیستم TBC و مقاومت حرارتی تماس در لایه‌های لایه‌بندی مرتبط می‌کند. بنت و یو استفاده از این روش را بر روی 7YSZ رسوب شده توسط EB-PVD روی پوشش باند FeCrAlY

¹ Infrared Imaging

² Pulse-Echo Thermal Wave Infrared Imaging

³ Phase of Thermal Emission Spectroscopy

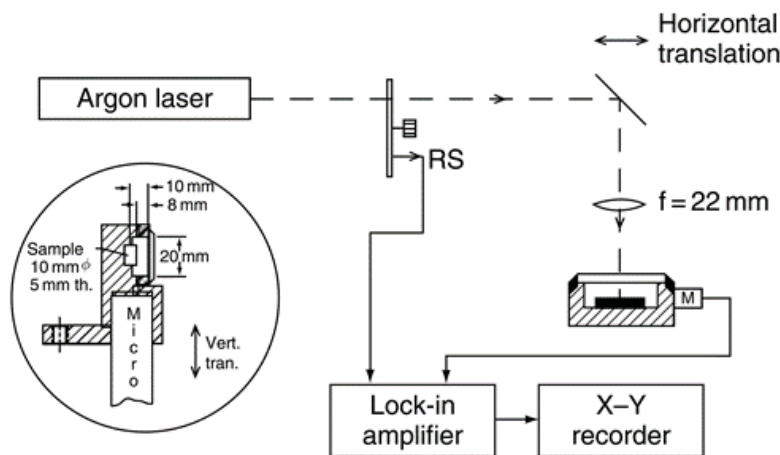
نشان دادند. ارزیابی میانگین رسانایی حرارتی EB-PVD رسوب شده 0.5 ± 0.144 W/mK و متوسط گرمای ویژه 0.5 ± 0.144 J/cm³.K و میانگین عمق نفوذ لیزر 3 ± 40 میکرومتر را نشان داد. لایه لایه شدن، در صورت وجود، به عنوان مقاومت تماس حرارتی منعکس می‌شود. همانطور که قبلاً ذکر شد یکی از مزایای این روش عدم نیاز به آماده سازی نمونه است [۲۶].

۲-۶- انتشار آکوستیک^۱

انتشار آکوستیک به عنوان امواج تنشی الاستیک گذرا تولید شده توسط انتشار انرژی از یک منبع موضعی تعریف می‌شود. هنگامی که عیوب در مواد شکل گرفته یا رشد می‌کند، تنش‌های داخلی دوباره توزیع می‌شوند و منجر به انتشار انرژی می‌شود که به عنوان انتشار آکوستیک شناخته می‌شوند [۲۷]. حسگرهای پیزوالکتریک می‌توانند این امواج تنشی را تشخیص دهند. نمونه‌های پوشش داده شده، زمانی که تحت بارگذاری کششی یا فشاری قرار می‌گیرند، انتشارات آکوستیک را آزاد می‌کنند. نمونه‌های پوشش داده شده با مانع حرارتی توسط انتشار آکوستیک در طول چرخه حرارتی تحت یک منبع حرارتی لامپ کوارتز مادون قرمز نظارت شده‌اند. شروع و رشد ترک‌های عمودی در پوشش سرامیکی و لایه‌برداری در سطح مشترک پوشش سرامیکی - باند با فعالیت انتشار صوتی قابل توجهی در ارتباط است [۲۸، ۲۹].

۲-۷- روش فوتو آکوستیک^۲

در این فرآیند (شکل ۲)، سطح نمونه پوشش توسط پرتو لیزر گرم می‌شود که با فرکانس مشخصی خرد می‌شود. نمونه در یک سلول پر شده با گاز با پنجره کوارتزی نگهداری می‌شود. سطح داغ نمونه، گرما را به داخل و گاز اطراف می‌دهد و باعث ایجاد فشار یا امواج صوتی می‌شود. میکروفون‌هایی که در سلول نگهداری می‌شوند امواج را تشخیص می‌دهند [۳۰، ۳۱]. سیگنال‌های تولید شده در میکروفون‌ها تقویت شده و به طور مناسب نمایش داده می‌شوند. دامنه و فاز امواج صوتی به دمای سطح نمونه بستگی دارد. دمای سطح به نوبه خود به ضخامت، خواص حرارتی زیرسطحی و وجود عیوب بستگی دارد. عمق نفوذ موج صوتی از مرتبه μm است که μ ، κ ، c ، p و u به ترتیب طول انتشار حرارتی، هدایت حرارتی، ظرفیت حرارتی، چگالی و فرکانس برش لیزری هستند. تغییر فرکانس برش، به طور کلی بین ۴ تا ۳۰۰ هرتز، برای دسترسی به فضای داخلی پوشش از جمله عیوب و فصل مشترک‌ها، عمق نفوذ امواج صوتی را تغییر می‌دهد. سیگنال‌ها تحت تأثیر نقص قرار می‌گیرند. آیتال و همکاران نشان داده‌اند که این روش می‌تواند نقص‌های سطحی معرفی شده مصنوعی را در پوشش‌های پلاسما پاشیده شده با ضخامت چند میکرون تشخیص دهد [۳۲].



شکل ۲: شماتیک روش فوتوآکوستیک [۳۲].

¹ Acoustic Emission

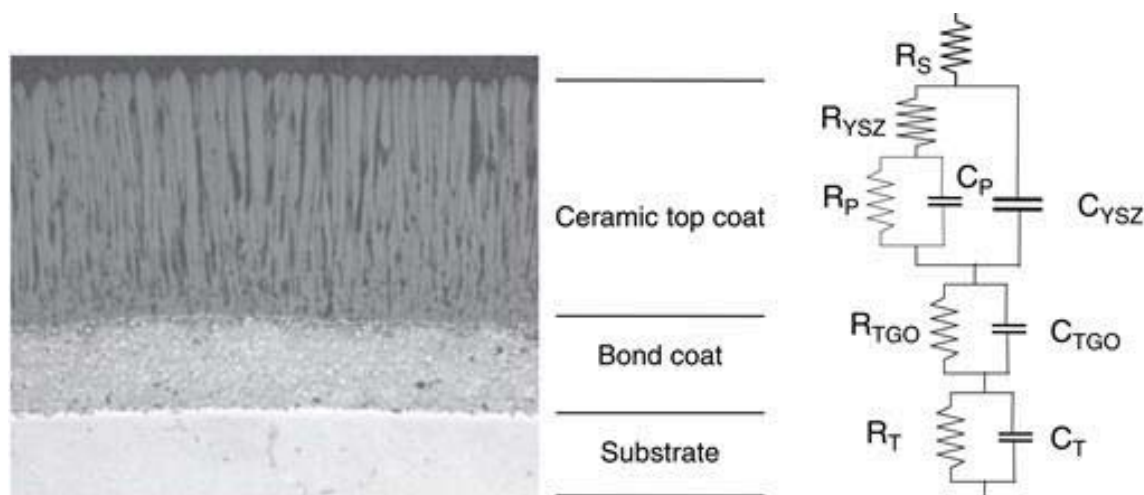
² Photoacoustic Technique

۲-۸- انعکاس مادون قرمز میانی^۱

این روش برای TBCها بر اساس زیرکونیای تثبیت شده با ایتریا (YSZ) ارزیابی شده است. YSZ به امواج مادون قرمز میانی (MIR) با طول موج در محدوده ۳ تا ۵ میلی‌متر شفاف است. هنگامی که سطح TBC، به ویژه نسخه پاشش شده با پلاسمای هوا، توسط MIR تابش می‌شود، امواج منعکس می‌شوند [۳۳، ۳۴]. بازتاب سه جزء دارد: انعکاس از سطح خارجی، پراکندگی در داخل پوشش و بازتاب از سطح مشترک بین پوشش باند سرامیکی و فلزی. با ادامه چرخه حرارتی TBC، ترک‌ها در پوشش سرامیکی نزدیک سطح مشترک ایجاد می‌شوند و به هم متصل می‌شوند. شکاف‌های هوایی تغییرات بزرگ در ضریب شکست از ۲ به ۱ ایجاد می‌کند. این منجر به افزایش بازتاب می‌شود. ال‌دریچ و همکاران دریافتند که TBC وقتی انعکاس به ۷۱ درصد رسید، لایه لایه شد. اندازه‌گیری‌های بازتاب را می‌توان در یک طیف‌سنج فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) با اتصالی برای ادغام امواج منعکس شده بر روی یک نیم‌کره انجام داد. نمایه بازتابی نمونه‌های پوشش داده شده را می‌توان برای NDI نقص استفاده کرد، در حالی که سیگنال‌های پوشش‌های چرخه حرارتی می‌توانند برای تخمین عمر باقی مانده استفاده شوند [۳۵، ۳۶].

۲-۹- طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی^۲ (EIS)

این روش برای رسانای یونی مانند زیرکونیا و اکسیدهای تشکیل شده به عنوان محصولات خوردگی روی فلزات قابل استفاده است. این بر اساس اصول الکتروشیمیایی است. این روش از یک الکترولیت در تماس با مواد آزمایشی مانند لایه سرامیکی TBC استفاده می‌کند [۳۷]. راه‌اندازی به طور کلی شامل یک سلول الکتروشیمیایی سه الکترودی است که با یک الکترولیت در دمای ثابت در تماس است. یک الکترولیت مناسب ۰/۰۱ مولار پتاسیم فری و فروسیانید، $K_3FeCN_6/K_4FeCN_6 \cdot 3H_2O$ است [۳۸، ۳۹]. TBC به عنوان الکتروود کار متصل به زمین عمل می‌کند. معمولاً از یک الکتروود کالومل به عنوان مرجع استفاده می‌شود، در حالی که پلاتین به شکل شبکه سیمی یک الکتروود متقابل ایجاد می‌کند. یک ولتاژ بین الکتروود کار و شمارنده اعمال می‌شود. امپدانس الکتریکی سیستم و زاویه فاز پارامترهایی هستند که به عنوان تابعی از فرکانس ولتاژ اعمال شده، در محدوده‌ای بین چند میلی‌هرتز و ۱۰۰ کیلوهرتز اندازه‌گیری می‌شوند. امپدانس الکتریکی یک عدد مختلط با دو قسمت است، یک قسمت واقعی حاوی مقاومت و یک قسمت موهومی حاوی ظرفیت است و برای تجزیه و تحلیل به نمودارهای برداری نیاز دارد. داده‌ها با مدل‌سازی ویژگی‌های ریزساختاری سیستم TBC به عنوان یک مدار الکتریکی معادل تجزیه و تحلیل می‌شوند (شکل ۳) [۴۰، ۴۱].

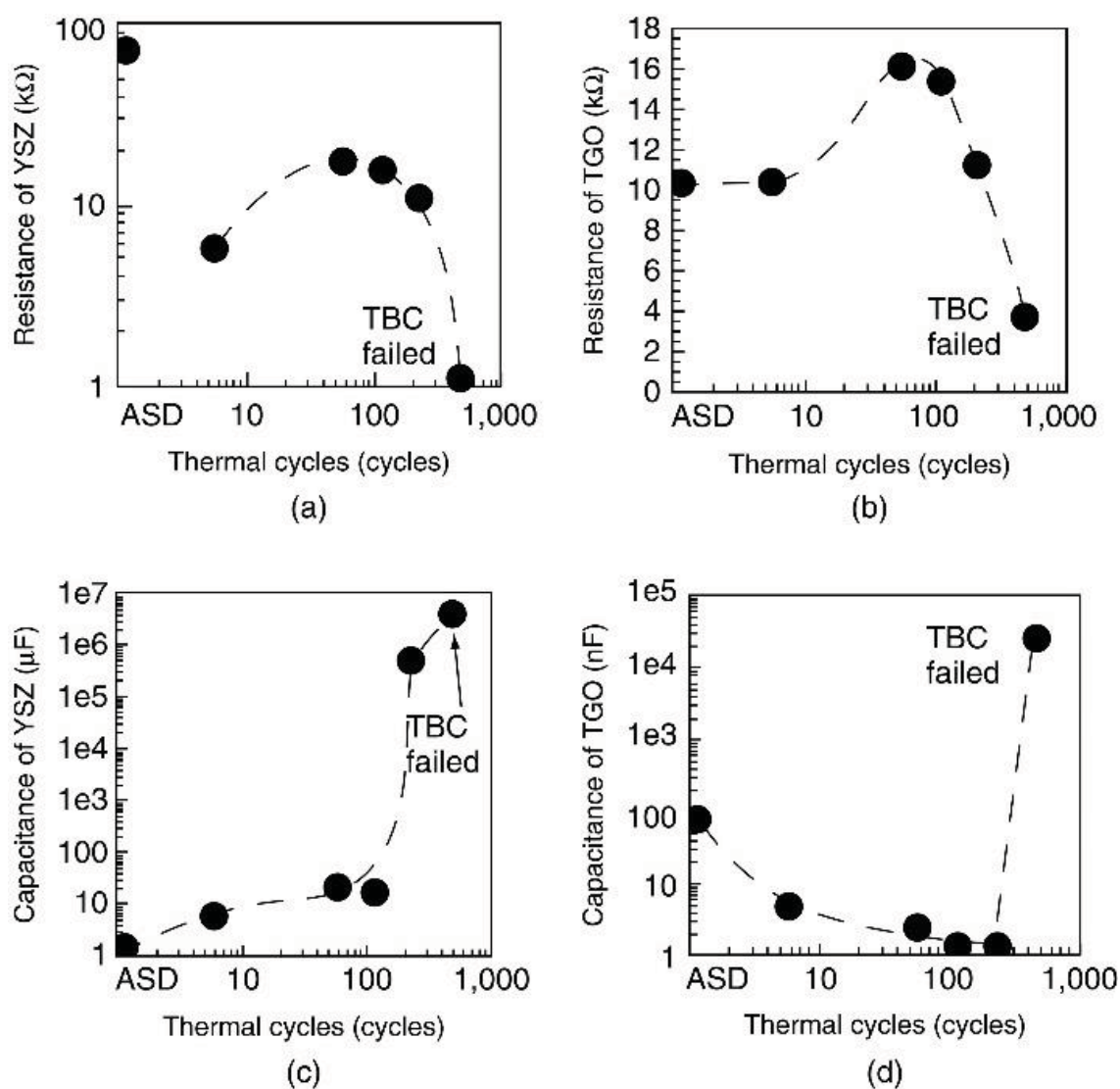


شکل ۳: مدار معادل AC ریزساختار TBC متشکل از سرامیک EB-PVD، TGO، در فصل مشترک و پوشش باند فلزی [۴۳].

^۱ Mid-infrared Reflectance

^۲ Electrochemical Impedance Spectroscopy

مدار از تعدادی مقاومت R و ظرفیت C تشکیل شده است. در این شکل، زیرمجموعه‌های S، YSZ، P، TGO، و T به ترتیب مربوط به مشارکت الکترولیت، پوشش سرامیکی، تخلخل، TGO و فصل مشترک پوشش سرامیکی- فلزی هستند. از نمودارهای مقاومت و ظرفیت به عنوان تابعی از فرکانس، پارامترهای ریزساختاری مانند ضخامت TGO، تخلخل سرامیکی، شکل منافذ، و وجود لایه لایه شدن سطحی بدون از بین بردن نمونه‌های آزمایشی ارزیابی می‌شوند. هر دو مقاومت الکتروشیمیایی و ظرفیت پوشش سرامیکی و TGO را می‌توان به طور مستقل از طیف EIS تعیین کرد شکل ۴ نمونه‌ای است که تغییر این پارامترها را به عنوان تابعی از چرخه حرارتی TBC متشکل از یک پوشش سرامیکی EB-PVD 7YSZ و یک نپوشش باند NiCoCrAlY بر روی بستر سوپرآلیاژ IN738 نشان می‌دهد. واضح است که تکامل مقاومت و ظرفیت هر دو تابع قوی از تعداد چرخه‌ها است. این همبستگی نشان می‌دهد که EIS می‌تواند به عنوان یک فرآیند NDI برای ارزیابی میزان آسیب ناشی از چرخه حرارتی استفاده شود. مطالعات جدیدتر نشان داده‌اند که با روش EIS، زینترینگ به دلیل قرار گرفتن در معرض دمای بالا و همچنین تشکیل ماکروتورک ناشی از کوئچ شدن حرارتی در 7YSZ یکپارچه، رشد سهموی TGO و شکست قریب‌الوقوع EB-PVD TBC قابل تشخیص است [۴۲، ۴۳].

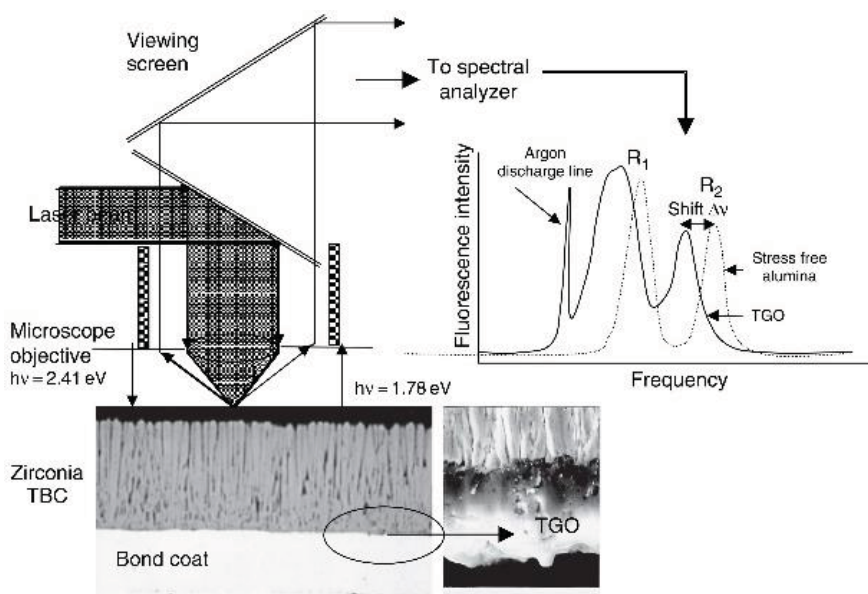


شکل ۴: تغییر مقاومت و ظرفیت لایه‌های YSZ و TGO به عنوان تابعی از چرخه حرارتی: ۱۰ دقیقه گرم کردن، ۴۰ دقیقه نگه داشتن و ۱۰ دقیقه هوای اجباری خنک کننده. دمای نگهداری ۱۱۲۱ درجه سانتی‌گراد، ۲۰۵۰ درجه فارنهایت [۴۰].

۲-۱۰- پیزو طیف‌سنجی فوتولومینسانس^۱ (PLPS)

اصل اساسی پیزو طیف‌سنجی فوتولومینسانس (PLPS) در شکل ۵ نشان داده شده است. آلیاژهای معمولی و پوشش‌های باند فلزی که روی آن‌ها TBC اعمال می‌شود، همیشه حاوی کروم یا به عنوان بخشی از ترکیب یا به عنوان ناخالصی هستند [۴۴، ۴۵]. اتم‌های کروم در ساختار اکسید آلومینیوم TGO اکسید آلومینیوم به شکل یون‌های Cr^{3+} گنجانده شده‌اند. در تابش با یک پرتو لیزر با فرکانس مناسب (مثلاً یک لیزر آرگون با طول موج ۵۱۴۹ آنگستروم)، یون‌های Cr^{3+} فلورسان می‌کنند. در مقیاس اتمی، آنچه اتفاق می‌افتد به شرح زیر است: الکترون بیرونی در مدار اطراف هسته یون کروم، تابش لیزر فرودی را جذب می‌کند، که الکترون را به سطح انرژی بالاتری می‌برد. الکترون متعاقباً به سطح انرژی پایین‌تری می‌افتد و انرژی آزاد می‌کند که به عنوان تابش فلورسنت یا لومینسانس شناخته می‌شود [۴۶]. از آنجایی که این فرآیند توسط تابش در طیف مرئی تحریک می‌شود، به آن لومینسانس تحریک شده با نور می‌گویند. طول موج و فرکانس با $U = c/\lambda$ مرتبط هستند که در آن c سرعت نور است. لومینسانس تحریک شده از یون‌های Cr^{3+} به صورت طیف‌شناسی تجزیه و تحلیل می‌شود. این طیف از دو خط قوی R_1 و R_2 تشکیل شده است (شکل ۶)، که در فرکانس‌های ۱۴۴۰۲ و ۱۴۴۳۲ برای اکسید آلومینیوم بدون تنش، مانند یاقوت کبود، قرار دارند. خطوط اضافی مربوط به سایر فازهای اکسید آلومینیوم مانند نیز ممکن است وجود داشته باشد. ریزساختار ستونی زیرکونیای تثبیت‌شده با ایتریا (YSZ) رسوب‌شده EB-PVD به‌عنوان راهنمای موج عمل می‌کند و شدت پرتو لیزر فرودی را برای ضخامت YSZ تا حدود ۳۰۰ متر به‌طور قابل توجهی کاهش نمی‌دهد. با این حال، پلاسمای هوای پاشیده شده به YSZ با ریزترک‌های آرام و تخلخل تا حد زیادی پرتو فرودی را ضعیف می‌کند و ضخامت YSZ را برای تجزیه و تحلیل به زیر ۷۵ میکرومتر محدود می‌کند. تنش در TGO منجر به جابجایی خطوط نسبت به اکسید آلومینیوم بدون تنش می‌شود. تغییر فرکانس از طریق رابطه‌ای که در آن جابجایی فرکانس است به دست می‌آید که σ_{av} تنش پسماند درون TGO است، به تنش پسماند مربوط می‌شود، Π_{ii} تانسور پیزو طیف‌سنجی است،

$$\Delta U = \frac{2\sigma_{av}\Pi_{ii}}{3} \quad (1)$$

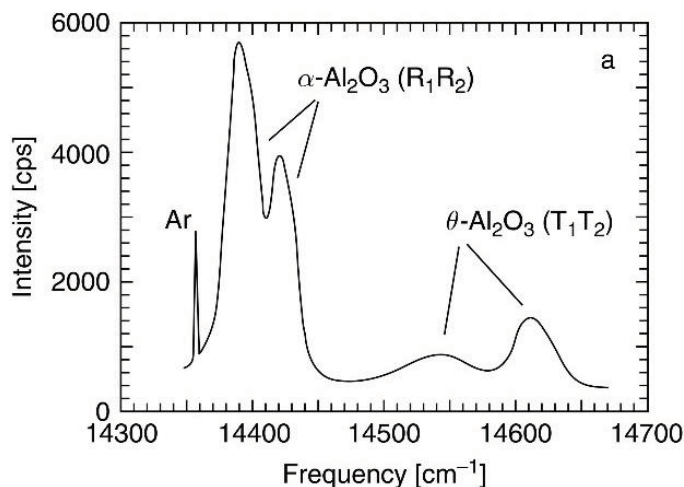


شکل ۵: اصل اندازه‌گیری پیزو طیف‌سنجی تنش پسماند [۴۶]

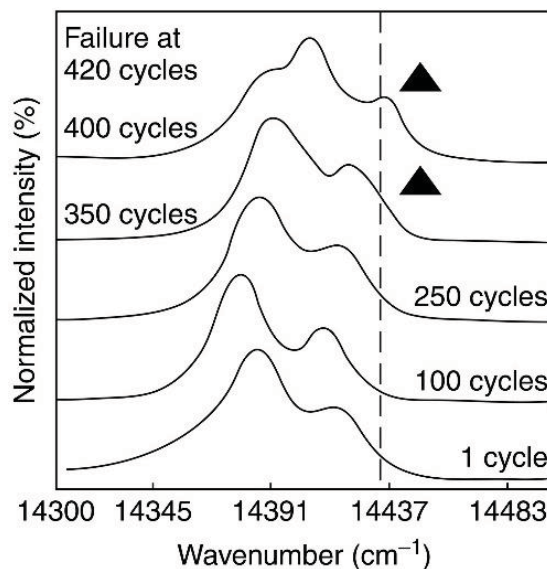
تجزیه و تحلیل طیف‌شناسی جابجایی فرکانس خطوط R_1 و R_2 و همچنین موقعیت اکسید آلومینیوم فاز برای مشخص کردن

¹ Photoluminescence Piezospectroscopy

تنش TGO، برای ارزیابی کیفیت، و برای تشخیص وجود لایه‌لایه شدن سطحی استفاده شده است. برای سیستم‌های TBC که تغییرات یکنواخت تنش را با قرار گرفتن در معرض حرارت نشان می‌دهند (که به ترکیبی از پارامترهای پردازش و ویژگی‌های پوشش باند بستگی دارد) یا در جایی که لایه‌لایه شدن در سطح مشترک اجازه می‌دهد تا لومینسانس از TGO کاهش یافته از تنش تشخیص داده شود، PLPS می‌تواند به عنوان یک دستگاه استفاده شود. روش NDI این پتانسیل ارزیابی آسیب و تخمین عمر باقی مانده در استفاده واقعی را دارد. شکل ۷ نمونه‌ای است که تکامل طیف‌های لومینسانس را با چرخه حرارتی EB-PVD TBC نشان می‌دهد. سرامیک بر روی یک پوشش باند آلومینید پلاتین قرار می‌گیرد. در آزمایش، TBC از ۴۲۰ چرخه جان سالم به در برد. در حدود ۳۵۰ چرخه علائم لایه‌برداری قابل تشخیص است زیرا TGO عملاً بدون تنش می‌شود.



شکل ۶: طیف فلورسانس از TGO حاوی آلفا و تتا آلومینا [۴۷].



شکل ۷: تکامل طیف PLPS در چرخه حرارتی از یک TBC متشکل از EB-PVD 7YSZ بر روی یک پوشش باند آلومینید پلاتین. پس از ۳۵۰ چرخه، لومینسانس از TGO تنش‌زدایی شده قابل مشاهده است. شکست پس از ۴۲۰ چرخه رخ داد [۴۰].

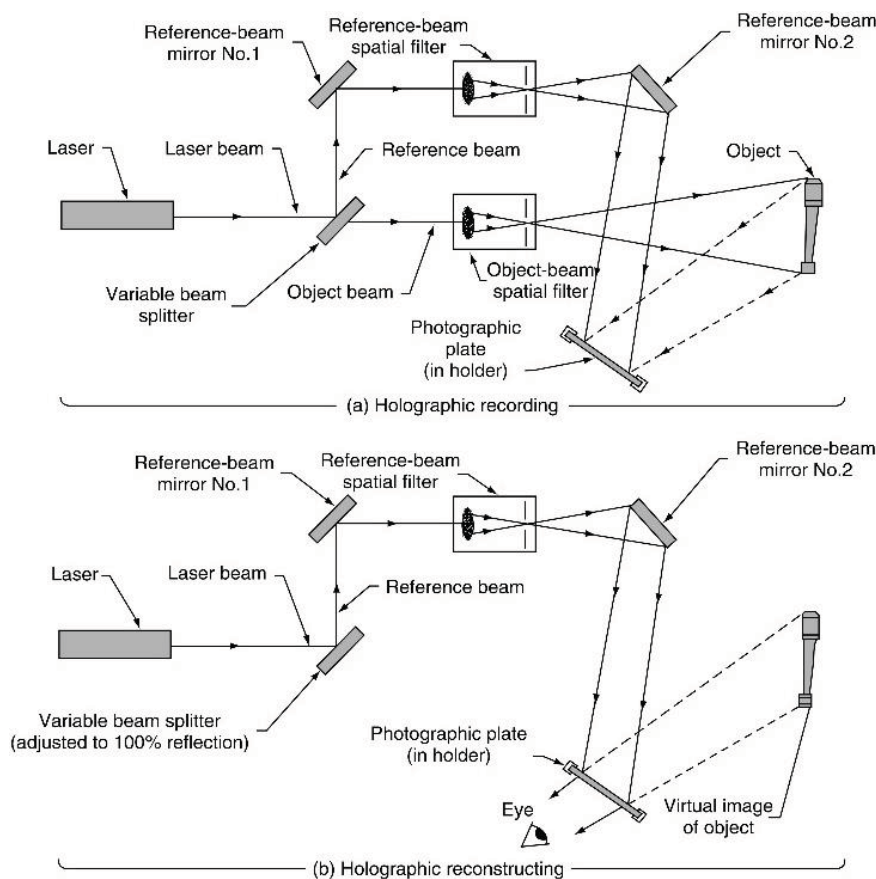
۲-۱۱- روش‌های تداخل‌سنجی^۱

^۱ Interferometric Techniques

در این گروه از روش‌ها، اصل تداخل نوری نقش کلیدی را ایفا می‌کند. دو پرتو تک‌رنگ نوری که از یک منبع منشا می‌گیرند برای ایجاد یک الگوی تداخل استفاده می‌شود. یکی از پرتوها به شیء مورد بازرسی و بازگشت به آن سفر می‌کند و با پرتو دیگری که مستقیماً از منبع می‌آید ملاقات می‌کند. یک الگوی تداخلی تشکیل می‌شود که حاوی اطلاعاتی درباره شیء است. تجزیه و تحلیل الگوهای تداخل جزئیات ویژگی‌های مختلف جسم، از جمله نقص‌ها را ارائه می‌دهد. انواع مختلفی از روش‌های تداخل‌سنجی موجود است که در جزئیات آن‌ها متفاوت است.

۲-۱۲- هولوگرافی^۱

هولوگرافی فرآیندی است که در آن یک تصویر سه‌بعدی از یک شیء با استفاده از لیزر ایجاد می‌شود (شکل ۸) [۴۸]. از دو مرحله تشکیل شده است. اولین مرحله ایجاد هولوگرام با جدا کردن نوری پرتو لیزر به دو پرتو با استفاده از تقسیم‌کننده پرتو است. یکی از پرتوها که به عنوان پرتو مرجع شناخته می‌شود، پس از انبساط و فیلتر کردن پرتو بر روی یک فیلم هولوگرافیک با وضوح بالا پخش می‌شود تا فیلم را به طور یکنواخت بپوشاند. پرتو دوم، به طور مشابه منبسط و فیلتر شده، از جسم منعکس می‌شود [۴۹]. این پرتو، حامل تمام اطلاعات در مورد توپوگرافی جسم، با پرتو مرجع در فیلم هولوگرافیک ملاقات می‌کند و یک الگوی تداخلی ایجاد می‌کند که به عنوان هولوگرام روی فیلم ثبت می‌شود. مرحله دوم این است که هولوگرام تمام شده را با پرتویی شبیه به پرتو مرجع اصلی روشن کنید. این فرآیند شیء را بازسازی می‌کند. این تصویر بازسازی شده ممکن است بعداً با شیء واقعی مقایسه شود تا تغییرات در پارامترهایی مانند شکل، ابعاد و بافت ارزیابی شود [۴۸].



شکل ۸: تصویر شماتیک ایجاد هولوگرام و بازسازی نمایه شیء [۴۸].

¹ Holography

۲-۱۳- تداخل سنجی امواج حرارتی^۱

این فرآیند بر روی پوشش‌های سایش شده با پلاسما و همچنین TBCها نشان داده شده است [۵۰]. این دستگاه از یک پرتو لیزر استفاده می‌کند که در فرکانس بین ۵ تا ۸۰۰ هرتز توسط یک چاپر مکانیکی مدوله شده است. پرتو بر روی سطح پوشش اسکن می‌شود. گرمایش متناوب سطح پوشش داده شده یک موج حرارتی ایجاد می‌کند که به داخل تا سطح مشترک منتشر می‌شود. در سطح مشترک، بخشی از موج حرارتی به عقب منعکس می‌شود. جزء منعکس شده با موج فرودی در سطح برخورد می‌کند و الگوهای تداخلی را تشکیل می‌دهد [۵۱]. یک آشکارساز مادون قرمز مشخصات حرارتی، از جمله دامنه و فاز موج حرارتی را نظارت می‌کند. پروفیل با ضخامت پوشش و وجود عیوب زیرسطحی و سطحی متفاوت است [۵۲].

۲-۱۴- شاروگرافی و تداخل سنجی الگوی لکه‌های الکترونیکی^۲

این روش‌ها همچنین بر اساس اصول تداخل سنجی هولوگرافیک هستند. با این حال، آن‌ها از دو لیزر برای ایجاد الگوهای تداخلی استفاده می‌کنند که به صورت لکه‌ها ظاهر می‌شوند. فرآیندها در بازرسی لایه‌لایه شدن در TBCها با موفقیت ارزیابی شده‌اند [۵۳، ۵۴].

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش‌های بررسی‌های غیرمخرب مورد استفاده برای ارزیابی پوشش‌های پاشش حرارتی ارائه شد و روش‌هایی برای شناسایی عیوب سطوح و فصل مشترک بین لایه‌های سرامیکی و باند فلزی، شکل، اندازه و محل آن و اندازه‌گیری تخلخل و ضخامت ارائه شد. این روش‌ها شامل جریان‌های گردابی، تصویربرداری مادون قرمز، فاز طیف‌سنجی انتشار حرارتی، روش‌های آکوستیک، فوتوآکوستیک، انعکاس مادون قرمز میانی، طیف‌سنجی امیدانس الکتروشیمیایی، پیژوپلیف‌سنجی فوتولومینسانس و روش‌های تداخل سنجی است. در هر یک از روش‌ها، مشخصه‌های مورد نیاز برای ارزیابی انواع عیوب به صورت مفصل بررسی شد.

مراجع

- [1]. M. Alvin, K. Klotz, B. McMordie, D. Zhu, B. Gleeson, and B. Warnes, "Extreme temperature coatings for future gas turbine engines," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 136, no. 11, 2014.
- [2]. J. I. Eldridge, C. M. Spuckler, and R. E. Martin, "Monitoring Delamination Progression in Thermal Barrier Coatings by Mid-Infrared Reflectance Imaging," *International journal of applied ceramic technology*, vol. 3, no. 2, pp. 94-104, 2006.
- [3]. V. K. Tolpygo, D. Clarke, and K. Murphy, "Evaluation of interface degradation during cyclic oxidation of EB-PVD thermal barrier coatings and correlation with TGO luminescence," *Surface and Coatings Technology*, vol. 188, pp. 62-70, 2004.
- [4]. G. Chen, "Non-destructive evaluation (NDE) of the failure of thermal barrier coatings," in *Thermal Barrier Coatings: Elsevier*, 2011, pp. 243-262.
- [5]. H. Crutzen, F. Lakestani, and J. Nicholls, "SAW for the non destructive evaluation of thermal barrier coatings," in 1997 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. An International Symposium (Cat. No. 97CH36118), 1997, vol. 1, pp. 657-660: IEEE.
- [6]. W. Ellingson, "Development of nondestructive evaluation methods for structural ceramics," Argonne National Lab., IL (US) 1998.
- [7]. J. Sun, "Development of Nondestructive Evaluation Methods for Thermal Barrier Coatings," in Proc. 22 nd Annual Conference on Fossil Energy Materials, Pittsburgh, PA, 2008: Citeseer.
- [8]. S. Bose, "Chapter 8 - NONDESTRUCTIVE INSPECTION (NDI) OF COATINGS," in *High Temperature Coatings*, S. Bose, Ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2007, pp. 233-246.
- [9]. V. Shaisundaram, M. Chandrasekaran, S. Mohan Raj, and R. Muraliraja, "Investigation on the effect of thermal barrier coating at different dosing levels of cerium oxide nanoparticle fuel on diesel in a CI engine," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 41, no. 1, pp. 98-104, 2020.
- [10]. G. Venkadesan and J. Muthusamy, "Experimental investigation of Al₂O₃/8YSZ and CeO₂/8YSZ plasma sprayed thermal barrier coating on diesel engine," *Ceramics International*, vol. 45, no. 3, pp. 3166-3176,

¹ Thermal Wave Interferometry

² Shearography and Electronic Speckle Pattern Interferometry



- 2019.
- [11]. S. Unnikrishnakurup, J. Dash, S. Ray, B. Pesala, and K. Balasubramaniam, "Nondestructive evaluation of thermal barrier coating thickness degradation using pulsed IR thermography and THz-TDS measurements: A comparative study," *NDT & E International*, vol. 116, p. 102367, 2020.
 - [12]. V. Karthickeyan, P. Balamurugan, and R. Senthil, "Environmental effects of thermal barrier coating with waste cooking palm oil methyl ester blends in a diesel engine," *Biofuels*, vol. 10, no. 2, pp. 207-220, 2019.
 - [13]. G. Antonelli, M. Ruzzier, and F. Necci, "Thickness measurement of MCrAlY high-temperature coatings by frequency scanning eddy current technique," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 1997, vol. 78712, p. V004T15A001: American Society of Mechanical Engineers.
 - [14]. G. Antonelli, M. Ruzzier, and F. Cernuschi, "A calibration-free electromagnetic technique for NDT of metallic coatings," *Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics(Germany)*, vol. 3, no. 11, p. 145, 1998.
 - [15]. C. Rinaldi, V. Bicego, and P. P. Colombo, "Validation of CESI blade life management system by case histories and in situ NDT," 2006.
 - [16]. V. Zilberstein, I. Shay, R. Lyons, N. Goldfine, T. Malow, and R. Reiche, "Validation of multi-frequency eddy current MWM sensors and MWM-Arrays for coating production quality and refurbishment assessment," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 2003, vol. 3686, pp. 581-590.
 - [17]. G. Koutsakis, J. Saputo, E. Gingrich, M. Tess, S. Sampath, and J. B. Ghandhi, "Delamination failure on high-output diesel engine thermal barrier coatings," *SAE Technical Paper0148-7191*, 2022.
 - [18]. A. Ghoshal et al., "Molten particulate impact on tailored thermal barrier coatings for gas turbine engine," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 140, no. 2, p. 022601, 2018.
 - [19]. M. Ferber, A. Wereszczak, M. Lance, J. Haynes, and M. Antelo, "Application of infrared imaging to the study of controlled failure of thermal barrier coatings," *Journal of materials science*, vol. 35, no. 11, pp. 2643-2651, 2000.
 - [20]. Z. Huang et al., "Non-destructive evaluation of uneven coating thickness based on active long pulse thermography," *NDT & E International*, vol. 130, p. 102672, 2022.
 - [21]. G. Newaz and X. Chen, "Progressive damage assessment in thermal barrier coatings using thermal wave imaging technique," *Surface and Coatings technology*, vol. 190, no. 1, pp. 7-14, 2005.
 - [22]. P. J. Zombo, "Developing NDE Methods for Coated Combustion Turbine Components," *NASA*, no. 19980214846, 1998.
 - [23]. D. O. Thompson and D. E. Chimenti, "Review of progress in quantitative nondestructive evaluation," 2012.
 - [24]. L. Chen, P. Wu, P. Song, and J. Feng, "Potential thermal barrier coating materials: RE 3NbO7 (RE= La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy) ceramics," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 101, no. 10, pp. 4503-4508, 2018.
 - [25]. K. Ren, Q. Wang, G. Shao, X. Zhao, and Y. Wang, "Multicomponent high-entropy zirconates with comprehensive properties for advanced thermal barrier coating," *Scripta Materialia*, vol. 178, pp. 382-386, 2020.
 - [26]. T. D. Bennett and F. Yu, "A nondestructive technique for determining thermal properties of thermal barrier coatings," *Journal of applied physics*, vol. 97, no. 1, p. 013520, 2005.
 - [27]. F. Wen, Z. Long, Z. Xing, W. Guo, and Y. Huang, "Research on damage behavior of thermal barrier coatings based on acoustic emission technology," *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 38, no. 1, pp. 67-89, 2023.
 - [28]. J. Voyer, F. Gitzhofer, and M. Boulos, "Study of the performance of TBC under thermal cycling conditions using an acoustic emission rig," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 7, no. 2, pp. 181-190, 1998.
 - [29]. L. Wang et al., "Prediction of critical rupture of plasma-sprayed yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings under burner rig test via finite element simulation and in-situ acoustic emission technique," *Surface and Coatings Technology*, vol. 367, pp. 58-74, 2019.
 - [30]. C. Amaya, J. J. Prias-Barragan, J. C. Caicedo, J. M. Yañez-Limon, and G. Zambrano, "Impact of the Glancing Angle Deposition on the Yttria-Stabilized Zirconia Growth and Their Thermal Barrier Coating Properties," in *Coatings and Thin-Film Technologies: IntechOpen*, 2018.
 - [31]. S. Zhou, S. Shen, X. Fang, Q. Hou, and D. Zhao, "An accurate and rapid method to compare thermal insulation capacity of nine Gd-Yb-YSZ coatings," *Ceramics International*, vol. 45, no. 16, pp. 19910-19917, 2019.
 - [32]. S. Aithal, G. Rousset, L. Bertrand, P. Cielo, and S. Dallaire, "Photoacoustic characterization of subsurface defects in plasma-sprayed coatings," *Thin Solid Films*, vol. 119, no. 2, pp. 153-158, 1984.
 - [33]. Q. Fouliard, R. Ghosh, and S. Raghavan, "Quantifying thermal barrier coating delamination through luminescence modeling," *Surface and Coatings Technology*, vol. 399, p. 126153, 2020.
 - [34]. J. I. Eldridge and D. E. Wolfe, "Monitoring thermal barrier coating delamination progression by upconversion luminescence imaging," *Surface and Coatings Technology*, vol. 378, p. 124923, 2019.
 - [35]. J. Eldridge, C. Spuckler, J. Nesbitt, and K. Street, "Health monitoring of thermal barrier coatings by mid-infrared reflectance," in *27th Annual Cocoa Beach Conference*, 2002.
 - [36]. J. T. DeMasi-Marcin, K. Sheffler, and S. Bose, "Mechanisms of degradation and failure in a plasma-deposited thermal barrier coating," 1990.
 - [37]. K. Ogawa, D. Minkov, T. Shoji, M. Sato, and H. Hashimoto, "NDE of degradation of thermal barrier coating by means of impedance spectroscopy," *Ndt & E International*, vol. 32, no. 3, pp. 177-185, 1999.



- [38]. J. Zhang and V. Desai, "Evaluation of thickness, porosity and pore shape of plasma sprayed TBC by electrochemical impedance spectroscopy," *Surface and Coatings Technology*, vol. 190, no. 1, pp. 98-109, 2005.
- [39]. T. Baskaran and S. B. Arya, "Influence of ceramic top coat and thermally grown oxide microstructures of air plasma sprayed $\text{Sm}_2\text{SrAl}_2\text{O}_7$ thermal barrier coatings on the electrochemical impedance behavior," *Surface and Coatings Technology*, vol. 344, pp. 601-613, 2018.
- [40]. Y. Sohn, B. Jayaraj, S. Laxman, B. Franke, J. Byeon, and A. M. Karlsson, "The non-destructive and nano-microstructural characterization of thermal-barrier coatings," *Jom*, vol. 56, no. 10, pp. 53-56, 2004.
- [41]. T. Da Silva, S. Mallarino, S. Touzain, and I. Margarit-Mattos, "DMA, EIS and thermal fatigue of organic coatings," *Electrochimica Acta*, vol. 318, pp. 989-999, 2019.
- [42]. B. Jayaraj, S. Vishweswariah, V. Desai, and Y. Sohn, "Changes in electrochemical impedance with microstructural development in TBCs," *JOM*, vol. 58, no. 1, pp. 60-63, 2006.
- [43]. B. Jayaraj, S. Vishweswariah, V. Desai, and Y. Sohn, "Electrochemical impedance spectroscopy of thermal barrier coatings as a function of isothermal and cyclic thermal exposure," *Surface and Coatings Technology*, vol. 177, pp. 140-151, 2004.
- [44]. N. Lu, Y. Zhang, and W. Qiu, "Comparison and selection of data processing methods for the application of Cr^{3+} photoluminescence piezospectroscopy to thermal barrier coatings," *Coatings*, vol. 11, no. 2, p. 181, 2021.
- [45]. Y. Zhang, N. Lu, and W. Qiu, "Optimal data processing method for the application of Eu^{3+} photoluminescence piezospectroscopy in thermal barrier coatings," *Coatings*, vol. 11, no. 6, p. 678, 2021.
- [46]. M. Gell, S. Sridharan, M. Wen, and E. H. Jordan, "Photoluminescence Piezospectroscopy: A Multi-Purpose Quality Control and NDI Technique for Thermal Barrier Coatings," *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 1, no. 4, pp. 316-329, 2004.
- [47]. V. Tolpygo and D. Clarke, "Microstructural study of the theta-alpha transformation in alumina scales formed on nickel-aluminides," *Materials at High Temperatures*, vol. 17, no. 1, pp. 59-70, 2000.
- [48]. V. Giurgiutiu, C. A. Rogers, Y. J. Chao, M. A. Sutton, and X. Deng, "Adaptive health monitoring concepts for spot-welded and weld-bonded structural joints," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 1997, vol. 18220, pp. 99-104: American Society of Mechanical Engineers.
- [49]. P. Yáñez-Contreras, M. León-Rodríguez, J. M. Medina-Flores, J. A. Jiménez-García, F. J. Santander-Bastida, and J. Yáñez-Rodríguez, "Determination of residual stresses in thermal barrier coating due to the amount of CMAS infiltration," *Dyna*, vol. 87, no. 215, pp. 76-83, 2020.
- [50]. J. Arbogast, R. Schaller, S. Lindemann, B. Schilder, M. Rohde, and H. J. Seifert, "Thermal wave interferometry measurements and microstructural analysis of twin wire arc spray cylinder coatings for passenger car engines," *Infrared Physics & Technology*, vol. 105, p. 103216, 2020.
- [51]. P. Song, P. Xiao, J. Liu, and Y. H. Wang, "The inspection of coating thickness uniformity of SiC-coated carbon-carbon (C/C) composites by laser-induced thermal-wave imaging," *Carbon*, vol. 147, pp. 348-356, 2019.
- [52]. D. Almond, P. Patel, and H. Reiter, "The testing of plasma-sprayed coatings by thermal-wave interferometry," *Materials Evaluation*, vol. 45, pp. 471-475, 1987.
- [53]. J. S. Gomes, J. Monteiro, and M. Vaz, "NDI of interfaces in coating systems using digital interferometry," *Mechanics of materials*, vol. 32, no. 12, pp. 837-843, 2000.
- [54]. P. Yan, Y. Wang, F. Sun, Y. Lu, L. Liu, and Q. Zhao, "Shearography for non-destructive testing of specular reflecting objects using scattered light illumination," *Optics & Laser Technology*, vol. 112, pp. 452-457, 2019.



Investigating Methods of Thermal Barrier Coating Evaluation Using Non-Destructive Methods

Majid Mirzaee*, Ashkan Zolriasatein

Assistant Professor, Non-metallic Material Research Department, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran

* mjmirzaei@nri.ac.ir

Abstract: The main focus of this review article is related to non-destructive testing methods used to evaluate thermal spray nanocoatings. These techniques include eddy currents, infrared imaging, phase thermal emission spectroscopy, acoustic, photoacoustic, mid-infrared reflection, electrochemical impedance spectroscopy, photoluminescence piezospectroscopy, and interferometry techniques. These techniques have been used to identify surface defects and interface between ceramic layers and metal interface, its shape, size and location and to measure porosity and thickness.

Keywords: Thermal barrier nanocoating, Zirconium stabilized yttria, Non-destructive tests.