

روش‌های پیشرفته پایش خوردگی و ضخامت آجر کوره

هودسا مجیدیان*، لیلا نیکزاد

پژوهشگاه مواد و انرژی

چکیده

سیستم‌ها و روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری خوردگی و ضخامت آستر کوره استفاده می‌شود که هر کدام مزایا و معایب خود را دارد. از جمله روش‌های نوین اندازه‌گیری خوردگی می‌توان به استفاده از لیزر، امواج آکوستیک، گرماسنجی و مایکروویو اشاره کرد. در این روش‌ها با تابش یک پرتو (لیزر، موج رادیویی، ...) و تحلیل عامل‌های بازتابش آن (مانند زمان بازتابش، تغییرات ایجاد شده در مشخصات آن و ...)، می‌توان خوردگی لایه آستر و پوشش دیرگداز را تخمین زد. مزایا و معایب و اصول کار هر روش در این مقاله بیان شده است.

واژگان کلیدی: اندازه‌گیری خوردگی، لیزر، آکوستیک، مایکروویو

مقدمه

پایش به‌عنوان مراقبت، نظارت، پیگیری یا بررسی چیزی تعریف می‌شود و منظور از آن هشیاری از وضعیت یک سامانه یا پدیده از راه مشاهده دگرگونی‌هایی است که ممکن است با گذر زمان در آن سامانه یا پدیده رخ دهد. اهمیت اندازه‌گیری خوردگی از نظر مبحث انرژی و پایش وضعیت دیرگداز به منظور افزایش کارکرد کوره در صنایع مختلف نمایان است. از این رو پژوهش‌ها و مطالعات تحقیقاتی بسیاری انجام شده تا مقاومت به خوردگی دیرگدازها اندازه‌گیری شود و روش‌های گوناگونی جهت بهبود آنها ارائه شده است. آنچه در این مطالعه به عنوان چالش مورد نظر قرار گرفته است روش تشخیص زودهنگام عیوب پایش از نیاز به تعمیرات اساسی و تخمین طول عمر دیرگداز می‌باشد. بنابراین تلاش شد تا روش‌های نوین اندازه‌گیری خوردگی بررسی شده و مزایا و معایب آنها مقایسه شود. این روش‌ها عبارتند از: استفاده از لیزر، امواج اولتراسونیک، گرماسنجی و مایکروویو.

۱- استفاده از لیزر

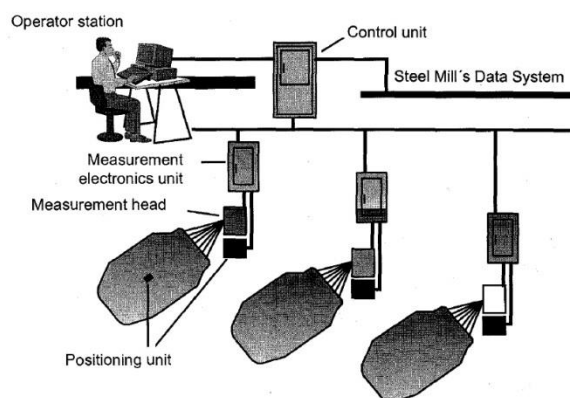
استفاده از لیزر یکی از روش‌های رایج اندازه‌گیری ضخامت دیرگداز و نشان دادن فرسایش آن است. اساس روش، اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت پرتو لیزر می‌باشد [۱]. در خصوص سابقه لیزر باید گفت که در سال ۱۹۹۹ [۲] در مقاله‌ای به استفاده از دستگاه کارآمد و سریع لیزر اشاره و گزارش شده است که این روش به نیروی انسانی کم و صرف مدت زمان ۱۰-۵ دقیقه وقت برای اندازه‌گیری نیاز دارد ولی چندان ایمن نیست؛ زیرا این وسیله اندازه‌گیری بسیار نزدیک دهانه کنورتور قرار می‌گیرد. بنابراین نیاز است تا سیستم به‌صورت خودکار از اتاق کنترل بتواند کنورتور را بررسی کند (شکل ۱). با پیشرفت این روش، اندازه‌گیری‌های مناطق مختلف و به‌طور سریع (در عرض ۲ دقیقه) با ایمنی بالا قابل انجام بود که نیازی به متوقف نمودن تولید نداشت. شکل ۲ نمونه‌ای از خروجی (پروفایل) اندازه‌گیری این روش را نشان می‌دهد. نقاطی که دارای ضخامت یکسان باشند، بر روی یک خط نشان داده می‌شوند.

اساس کار این روش طی دو ثبت اختراع بین‌المللی در سال‌های ۱۹۹۰ و ۱۹۹۲ بیان شد (شکل ۳) [۳-۵]. دستگاه شامل یک انتقال دهنده پیوسته لیزر (۱) با نوار باریک برای هدایت کردن پرتو لیزر (۲)

منوکروماتیک^۱ به سوی دیوار کوره (۳) است تا آستر کوره اسکن شود. پرتو بازتابش شده نور (۴) در صورت وجود خوردگی، در مسیر (۵) بازتابش شده و توسط یک دریافت کننده (۶) آرایه‌ای خطی خود اسکن کننده^۲ دریافت می‌شود. این آرایه شامل تعدادی المان نوری (۷) است که در کنار هم در راستای یک محور خطی قرار گرفته‌اند؛ هر المان در پاسخ به پرتو نور بازتابش شده، یک سیگنال الکتریکی نشان می‌دهد. از اختلاف میان المان‌های دریافتی اسمی و واقعی می‌توان ضخامت پوشش دیوار را به دست آورد. یک فیلتر تداخلی نوری با نوار عبوری باریک که تنها طول موج‌های پرتو نوری بازتابشی را عبور می‌دهد در جلوی آرایه خطی قرار می‌گیرد. این فیلتر دیگر تشعشعات زمینه مانند تشعشعات سطح داغ پوشش را حذف می‌کند. یک لنز نیز میان فیلتر و آرایه خطی قرار می‌گیرد تا پرتو نور بازتابش را روی آرایه متمرکز کند.

برای اندازه‌گیری فرسایش آستر دیرگداز کوره با استفاده از روش غیر تماسی لیزر لازم است تا بالای کوره حداقل یک ورودی داشته باشد. وسیله‌ای نیز برای قرار دادن دستگاه به روی ورودی بالای کوره و ابزاری برای چرخاندن دستگاه به منظور اسکن تمام سطح باید به همراه آن باشد. کل دستگاه باید درون یک سیستم عایق با آبگرد قرار گیرد تا دستگاه بتواند درون کوره داغ و مهاجم سالم بماند. پردازشگر الکترونی این دستگاه باید همراه با وسیله‌ای برای کاهش اثر تشعشعات زمینه باشد. عبور دهنده لیزر می‌تواند از نوع هلیوم-نئون، آرگون، هلیوم-کادمیم و ... باشد که بسته به نوع و دمای کوره می‌توان طول موج‌های مختلفی را تولید کرد.

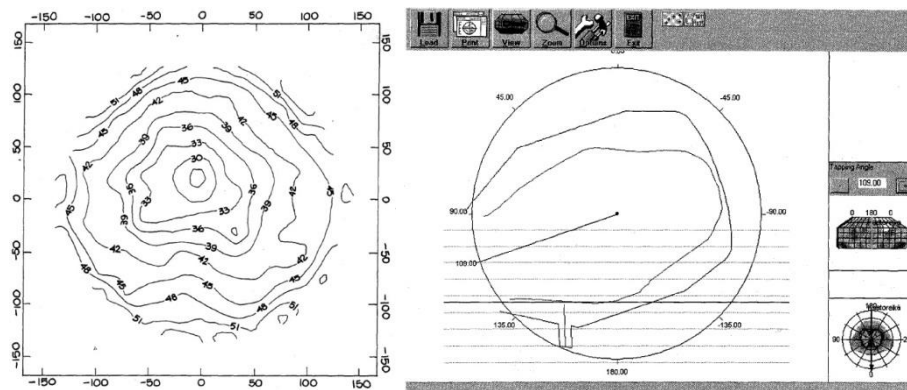
برای اندازه‌گیری فرسایش نیاز است تا دستگاه و هدف در مختصات مشخصی نسبت به هم، فیکس شوند تا خطای کمتری ایجاد شود. به طور معمول از روش مستقیم برای فیکس کردن استفاده می‌شود که با قرار دادن نقاط فیکس (مارک‌های ثابت) روی هدف مورد نظر انجام می‌باشد. هنگامی که هدف چرخان باشد، فیکس کردن به روش غیر مستقیم، به کمک مارک‌های ثابتی در انتهای مخزن یا بیرون آن انجام می‌شود. این کار توسط اپراتور دستگاه انجام می‌شود و اتوماتیک کردن عمل فیکس مشکل است که از معایب این روش به شمار می‌رود.



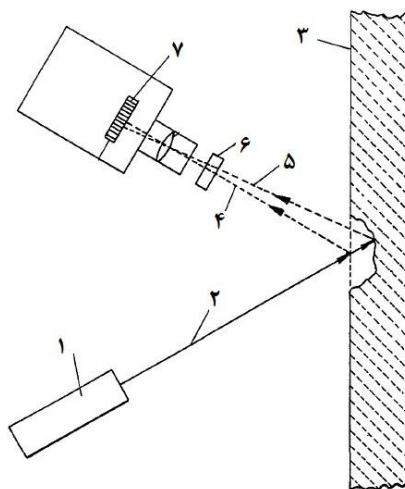
شکل ۱: سیستم خودکار اندازه‌گیری فرسایش پوشش کنورتورها [۲]

¹ collimated substantially

² Self-scanned linear array receiver



شکل ۲: (سمت راست) خروجی دستگاه (کنترل دهانه ورودی) [۲]؛ (سمت چپ) توپوگرافی کف کوره با لیزر [۳]

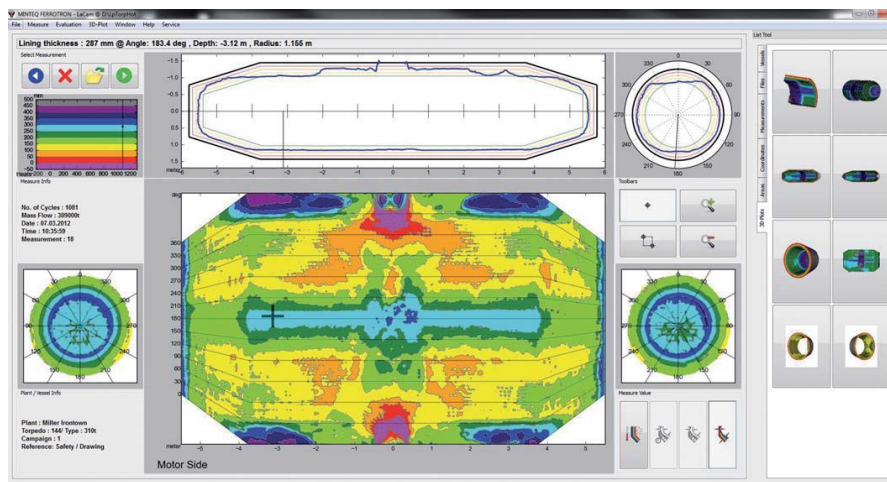


شکل ۳: برخورد لیزر با دیواره خورده شده [۳]

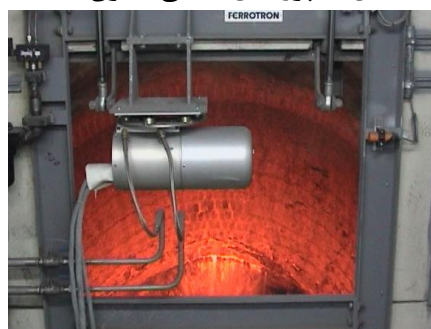
به عنوان مثال، می‌توان به اندازه‌گیری سه بعدی ضخامت پوشش دیرگداز در پاتیل تورپدو^۳ [۶،۷] از شرکت فروترون^۴ اشاره کرد که از این روش به عنوان روشی نوین ولی ساده یاد می‌کند که علاوه بر اندازه‌گیری ضخامت آجر می‌تواند نرخ یا سرعت فرسایش دیرگداز را تعیین کند. همچنین اطلاعاتی را در مورد بچ، بهینه سازی زاویه دهانه ورودی، ارزیابی کف و پروفایل دمایی مخزن در عرض چند ثانیه تأمین می‌کند (شکل ۴). امروزه اندازه‌گیری سه بعدی لیزری ابزاری استاندارد و مطمئن برای کنورتور، کوره‌های قوس الکتریکی و پاتیل‌های فولادسازی است. شرکت فروترون با معرفی LaCam® - Torpedo برای پاتیل‌های داغ، یک گام فراتر نهاده است. نسل چهارم سیستم اندازه‌گیری لیزر، ۱۷ بار سریعتر از ورژن قبلی خود و بسیار دقیق است که تاکنون بیش از ۲۷۰ سیستم در کل جهان فروخته شده است. این سیستم طی ۳۰ ثانیه، ۴ میلیون نقطه را اندازه‌گیری می‌کند و قدرت تفکیک بالایی دارد (شکل ۵) [۸،۹]. اندازه‌گیری با لیزر برای اندازه‌گیری غلظت و دمای گازهای خروجی کوره و پوشش داخلی بالمیل‌ها (لاینینگ) [۱۰-۱۴] نیز استفاده می‌شود.

³ Torpedo

⁴ Ferrotron



شکل ۴: پروفایل دمایی مخزن [۶]



شکل ۵: نسل چهارم سیستم اندازه‌گیری لیزری LacamR [۶]

۲- استفاده از امواج آکوستیک

این روش که در گروه تست‌های غیر مخرب گنجانده می‌شود توسط شرکت هاچ^۵ بسیار مورد توجه قرار گرفته است. هاچ از روش‌های جدید آکوستو اولتراسونیک-اکو^۶ و روش ترموگرافی^۷ برای بررسی ضخامت و یکپارچگی لایه‌ی نسوز کوره‌های عملیاتی استفاده می‌کند [۱۵].

روش آکوستو اولتراسونیک-اکو (AU-E) دارای قابلیت تعیین نفوذ فلز به داخل پوشش کوره، تعیین موقعیت ترک‌ها در آجر و پوسته شدن دیواره‌های کناری و آستری دهانه می‌باشد و بر اساس اصول انعکاس موج تنشی و بررسی اطلاعات فرکانس است. یک ضربه مکانیکی بر سطح (از طریق چکش یا ضربه زننده مکانیکی) سبب تولید یک پالس تنش شده که به درون لایه‌های کوره انتشار می‌یابد. قطر سر ضربه زننده تعیین کننده محدوده فرکانسی است. در این روش، موج تنشی اصلی و بازتاب آن جمع‌آوری و آنالیز می‌شود. از آنجا که سرعت موج از ماده‌ای به ماده دیگر بر اساس چگالی و خواص الاستیک تغییر می‌کند، یک

⁵ Hatch

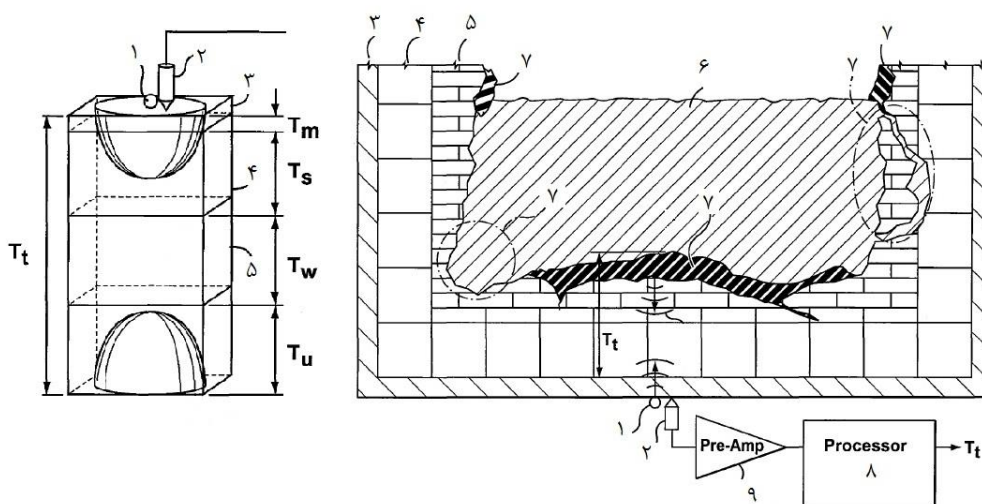
⁶ Acousto Ultrasonic- Echo (AU-E)

⁷ Infrared (IR) thermography

تغییر شدید و ناگهانی در چگالی، شکل و ابعاد لایه‌های دیرگداز یا خواص الاستیک مواد سبب بازتاب جزئی یا کامل موج می‌شود.

در مورد این روش ثبت اختراع‌هایی وجود دارد که به تفسیر اصول کار می‌پردازد (۲۰۰۸۰۰۹۲۶۵۸). [۱۶، ۱۷]. ابتدا یک موج تنشی گذرای انتشاری مانند یک موج تنش فشاری (یعنی طولی، اولیه، ...) برای تعیین شرایط پوشش دیرگداز استفاده می‌شود. بازتاب‌های موج تنشی ارزیابی می‌شود تا حضور و موقعیت عیوب مانند ترک‌ها، لایه‌ای شدن و حباب‌ها در دیرگداز و همچنین ضخامت باقیمانده دیرگداز مشخص شود. فرکانس موج‌ها از محدوده آکوستیک (قابل شنیدن) تا اولتراسونیک (غیر قابل شنیدن) می‌تواند باشد؛ مثلاً ۱۰۰ هرتز تا ۸۰ کیلوهرتز. این محدوده یک مزیت است چون ممکن است موج اولتراسونیک به تنهایی انرژی لازم برای عبور از دیرگدازهای ضخیم را نداشته باشد و یا اینکه از مواد هتروژن جامد سریع میرا شود. گاهی تأثیر دما بر سرعت موج تنشی باید بررسی شود. سرعت موج تنشی در هر فرکانس و دما ثابت نیست. فاکتور مقیاس α برای هر دیرگداز برای تنظیم سرعت فرضی موج قابل محاسبه است. مقدار α برای هر دیرگداز تابع مدول الاستیسیته E ، دما و گرادیان دما در آن است. در برخی موارد α بر حسب تغییرات نسبی E در یک محدوده دمایی یک نوع دیرگداز محاسبه می‌شود.

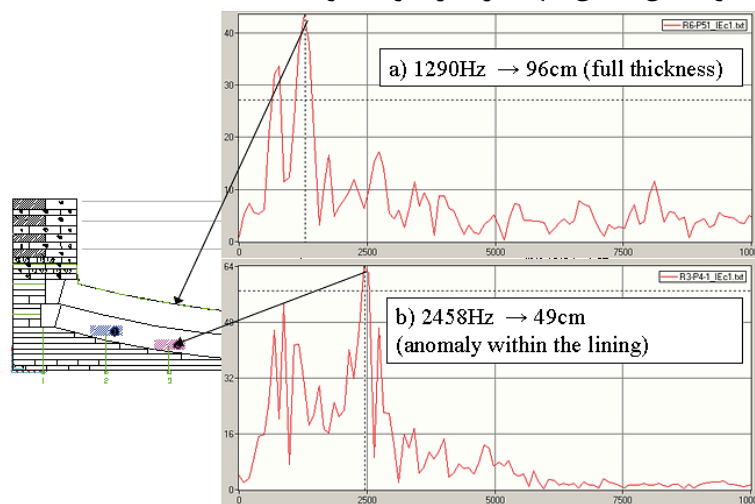
شکل ۶ کوره متالورژیکی با تمام عیوب و تخریب‌ها و دارای سیستم تک سنسور تک ضربه‌ای (SISS) است؛ زیرا یک ضربه زننده تکی (۱) و یک سنسور (۲) دارد که نسبت به هم تنظیم شده‌اند. پوسته خارجی فولادی کوره (۳)، اولین لایه دیرگداز (۴) و دومین لایه دیرگداز (۵) و مذاب (۶) است. تخریب دیرگداز (رشد یا کبره بستن، لایه‌ای شدن و فرسایش) با (۷) دیده می‌شود که تخمین ضخامت در نواحی مختلف باید با روش‌های یکسانی صورت پذیرد. موج باید توسط ضربه به پوسته ۳ ایجاد شود و از آجرهای ۴ و ۵ بگذرد. در فصل مشترک‌ها بازتاب موج ایجاد می‌شود به ویژه در فصل مشترک ۵ و ۶ و در عیوب ۷. پردازشگر ۸ و آمپلیفایر ۹ است.



شکل ۶: تشریح ساده سنسور تک ضربه‌ای (SISS) همراه با کوره [۱۶]

در حالت کلی وقتی که موج به فصل مشترک آکوستیک برسد، بسته به خواص فصل مشترک، کل موج یا بخشی از آن به سوی منبع ضربه باز می‌گردد. اگر ماده دوم امپدانس آکوستیک کمتری از ماده اول داشته

باشد (مثلاً دیرگداز نسبت به گاز یا دیرگداز نسبت به مایع)، بخش عمده‌ای از موج به جهت شروع خودش بر می‌گردد. از سوی دیگر اگر ماده دوم امپدانس آکوستیک بیشتری از ماده اول داشته باشد، بخشی از موج بر می‌گردد و بخش دیگر آن شروع به انتشار در ماده دوم می‌کند. بخش کوچکی از این موج منتشر شده در ماده دوم در فصل مشترک شکسته شده و بخش کوچک دیگری از آن به شکل موج‌های سطحی تغییر می‌کند. در فصل مشترک، بازتاب‌ها بر می‌گردند و یا به جلو پیش می‌روند تا جایی که به تدریج تقلیل یابند. اگر امپدانس آکوستیک دو ماده یکسان باشد، مقدار بازتاب کم است (سهم تقلیل یافتن طبیعی بیشتر است). برای اندازه‌گیری ضخامت پوشش دیرگداز کوره دمش شرکت فولادسازی بوکارو^۸ از روش‌های غیر مخرب اولتراسونیک با فرکانس کم، ضربه-اکو و ترموگرافی استفاده و گزارش شد که می‌توان از روش اولتراسونیک با فرکانس کم (۵۰ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز) استفاده کرد [۱۸، ۱۹]. نمونه‌ای از سیگنال‌های شرکت هاچ در شکل ۷ دیده می‌شود. برای سیگنال بالا a، پیک فرکانس به ضخامت کل کوره و سیگنال پایین b که در فرکانس بیشتر است، به کاهش ضخامت دیوار دلالت می‌کند. این روش برای تعیین هیدراتاسیون نیز استفاده می‌شود. هرچه مقدار هیدراته شدن بیشتر باشد، اجزای سیگنال‌های وابسته به زمان فرکانس بیشتری خواهند داشت و تقلیل یافتن آنها سریعتر خواهد بود.



شکل ۷: اندازه‌گیری ضخامت و شناسایی موارد غیر عادی توسط روش AU-E [۲۰]

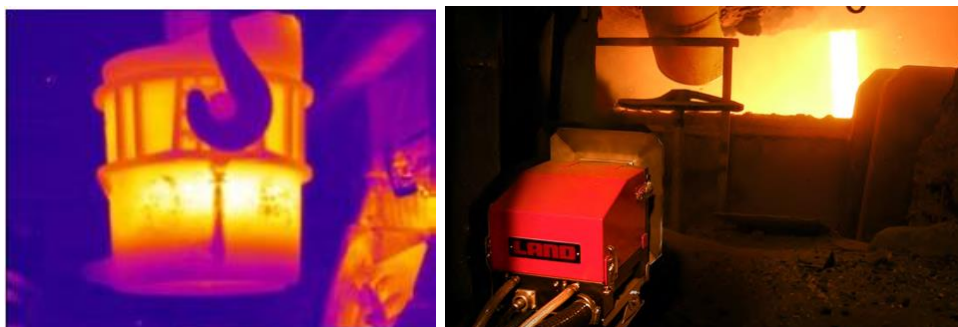
۳- ترموگرافی یا گرماسنجی مادون قرمز

عملکرد هر دستگاه همواره با انتشار گرما همراه است. گرمای منتشر شده از سطح بیرونی اجسام به صورت تشعشعات مادون قرمز که توسط چشم انسان قابل رویت نیستند آزاد می‌گردد. اما این تشعشعات را می‌توان از طریق دوربین‌های ترموگرافی مشاهده نمود. ترموگرافی کاربردهای فراوانی دارد؛ اما یکی از پر طرفدارترین کاربردهای آن استفاده به عنوان یک روش پایش وضعیت در تشخیص زود هنگام عیوب تجهیزات مختلف است. بررسی عایق‌بندی درزها، تلفات حرارتی و افت حرارت، بررسی توزیع داخل کوره با استفاده از دوربین-

⁸ Bokaro Steel Plant

های خاص، بررسی میزان افت گرما از راه دیواره و از همه مهم‌تر بررسی میزان خرابی و زوال آجرهای نسوز در کوره‌های خاص از جمله کاربردهای این روش است [۲۱].

اصول کار این روش ساده است و بر این اساس است که اجزاء یک سیستم هنگامی که به طرز صحیح کار نکنند، باعث افزایش دما می‌شوند. اگر اندازه‌گیری توزیع دما در سطح ماشین آلات در حین کار انجام شود و با توزیع دمایی آن ماشین در حالت کارکرد سالم مقایسه شود، می‌توان به وجود عیب پی برد. با استفاده از این ابزارها، نیازی به تماس فیزیکی با ماشین نیست و می‌توان اندازه‌گیری‌ها را در شرایط کامل عملیاتی انجام داد و از کاهش تولید یا از کار افتادن دستگاه‌ها جلوگیری نمود. دوربین‌های مادون قرمز وسیله‌ای است که انرژی حرارتی منتشر شده از اجسام را جمع‌آوری و آن را به یک تصویر رنگی با کیفیت تبدیل می‌کند که توسط نرم افزارهای خاص، تحلیل می‌شوند. الگوی حرارتی ناشی از ترموگرافی دیواره‌ی خارجی اگر دارای نواحی داغ باشد بیانگر فرسودگی دیرگداز بوده که نیاز به تعمیر و نگهداری وجود دارد. در شکل ۸ خوردگی لایه دیرگداز پاتیل فولاد و دوربین تصویری نشان داده شده است. از این روش در آنالیز فرسایش دیرگداز در شرکت آمتک^۹ استفاده شده است [۲۲].



شکل ۸: دوربین تصویری حرارتی شرکت آمتک [۲۲] (راست)؛ ترموگرافی سطح پاتیل فولاد (چپ) [۲۳]

۴- استفاده از مایکروویو [۲۴-۲۶]

این روش برای اندازه‌گیری ضخامت موادی است که مقدار مشخصی از تشعشعات مایکروویو را در فرکانس خاص از خود عبور می‌دهند. تشعشع مایکروویو تابش و بازتابش اندازه‌گیری می‌شود؛ در اثر تداخل هم‌سیمی مایکروویو بازتابش شده از سطوح، در یک محدوده فرکانس، بیشینه و کمینه‌ای خواهد داشت. ضخامت مواد از دوره بیشینه و کمینه با دانستن ضریب انعکاس مواد تعیین می‌شود.

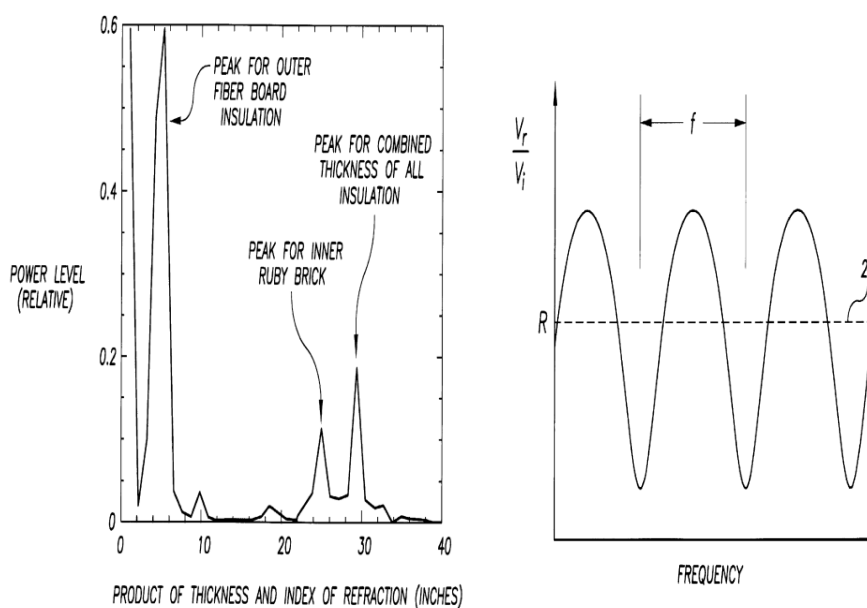
این روش برای موادی که در دسترس نیستند یا در محیط‌های غیر قابل دسترسی و مهاجم هستند، مانند دیرگدازهای کوره‌های دما بالا بسیار سودمند است. این کوره‌ها در بسیاری از صنایع مانند فولادسازی یا شیشه، بازیافت زباله و ضایعات استفاده می‌شوند. بنابراین پوشش عایق دیرگداز این کوره‌ها در معرض شرایط خشن و ناگواری است که موجب تخریب آنها می‌شود. در این روش برای اندازه‌گیری ضخامت مواد و نشان دادن خوردگی دیرگداز نیازی به دسترسی به سطح داخلی کوره نیست؛ دستگاه در محیط کوره قوی است، بر اساس مدل‌های حرارتی نیست، اندازه واقعی مستقیمی از ضخامت است و کوره را آلوده نمی‌کند. این

^۹ Ametek

روش محدودیت‌های دیگر وسایل و روش‌های شناخته شده تاکنون را ندارد و در کوره‌های دما بالا قابل استفاده است.

این روش از تشعشع مایکروویو هم سیما استفاده می‌کند که از بیرون به سطح پوشش دیرگداز کوره تابانده شده و بخشی از آن توسط سطح دیرگداز منعکس می‌شود. با تنظیم فرکانس مایکروویو در یک محدوده انتخابی می‌توان مقدار کل سیگنال منعکس شده را (که جمع هم سیمای انعکاسی از سطح هر دیرگداز است) بین مقدار بیشینه و کمینه‌ای قرار داد. دوره بیشینه و کمینه بر حسب فرکانس تنظیم شده، در یک ضریب انعکاس مشخص دیرگداز، به طور خطی با ضخامت آن دیرگداز متناسب است.

در فرکانس‌های مایکروویو سطوح ناهموار دیرگداز، به نظر صاف می‌آیند و رزونانس‌های (تشدید) مناسبی را ایجاد می‌کنند (بیشینه یا کمینه در سیگنال بازتاب شده بر حسب فرکانس). برای مثال، ناهمواری سطح در مقدار ۱ اینچ مانند ترک‌ها و یا فرورفتگی‌های ریز در سطوح دیرگداز در فرکانس‌های کمتر از ۱۰ گیگاهرتز، رزونانس را چندان ضعیف نمی‌کند. از آنجا که فرکانس با دقت بسیار زیاد قابل اندازه‌گیری بوده و ضریب انعکاس ماده دیرگداز با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به خوبی قابل شناسایی است، اندازه‌گیری‌های میانگین ضخامت با قدرت تفکیکی برابر با کسر بسیار کوچکی از ۱ اینچ، امکان پذیر است. اگر کوره دارای یک پوسته فلزی باشد، درون آن سوراخی ایجاد می‌شود تا بتوان به دیواره دیرگداز دسترسی پیدا کرد. شکل ۹ دیتاهای یک پوشش دیرگداز یک لایه با دو سطح را نشان می‌دهد که پرتو مایکروویو را بازتابش می‌کند.



شکل ۹: نسبت توان منعکس شده به توان ورودی بر حسب فرکانس (راست)؛ توان انتقال فوریه سیگنال یا ضخامت (چپ) [۲۴]

این روش به حالت‌های مختلف شکست دیرگداز حساس است. دیرگداز ممکن است به صورت نازک خورده شود یا فرسایش یابد؛ ممکن است توسط سرباره تر شود یا به صورت شیمیایی تغییر کند. هر کدام از این حالت‌های شکست، مرزی در ماده دیرگداز دارد که می‌تواند انعکاس پرتو مایکروویو را تحت تأثیر قرار دهد و در نتیجه شناسایی شود. تشکیل لایه‌ای از سرباره نیز بر سطح دیرگداز قابل مشاهده است. به علاوه از آنجا

که انعکاس الکترومغناطیس از یک سطح هادی الکتریکی با سطح غیر هادی متفاوت است، مقدار یا درجه سرباره مذاب درون کوره از روی تعداد اندازه‌گیری‌های ضخامت دیرگداز در مکان‌های مختلف قابل استنتاج است. این روش بسیار دقیق و به سادگی قابل اعمال است.

مراجع

- [1] D. H. Hubble, R. O. Russell, H. L. Vernon, R. J. Marr, Chapter 4, *Steelmaking Refractories*, 1998, The AISE Steel Foundation, Pittsburgh.
- [2] H. Ylonen, M. Jauhola, J. Lilja, S. Marttio, S. Ollila, P. Palmu, The use of novel technologies at a steel plant to improve process control and performance, *Steelmaking Proceedings (1999)* 361-377.
- [3] 4893933, Automatic BOF vessel remaining lining profiler and method.
- [4] 5127736, Apparatus for measuring wear in the lining of refractory furnaces.
- [5] US7924438B2, Method for measuring wear in the refractory lining of a metallurgical melting vessel.
- [6] LaCam® TORPEDO, Safety, Savings, Speed. www.ferrotron.com.
- [7] R. Lamm, Laser measurement system for the refractory lining of hot Torpedo ladles, Minteq International GmbH, Duisburg, Germany.
- [8] LaCam® - 4th Generation.
- [9] Minerals technologies develops new, faster laser measuring system for hot refractory linings in the worldwide steel industry, <http://uk.reuters.com>.
- [10] High temperature laser refractory thickness measurement, <http://www.processmetrix.com>
- [11] A. K. Chatterjee, Yatindranath, B. N. Panda and C. Mishra, Condition monitoring of oxygen steel making vessel by laser technique, <http://www.ndt.net>.
- [12] www.more-oxy.com
- [13] S. W. Allendorf, D. K. Ottesen, R. W. Green, D. R. Hardesty, Optical sensors for post combustion control in electric arc furnace steelmaking, AISI/DOE Technology Roadmap Program, Final Report.
- [14] www.outotec.com
- [15] A. Sadri, P. Gebiski, K. Mirkhani, G. McGarrie, New and innovative non-destructive testing (NDT) techniques for inspection and monitoring of metal smelting furnaces, Hatch Ltd.
- [16] US20080092658A1, Systems, methods and apparatus for non-disruptive and non-destructive inspection of metallurgical furnaces and similar vessels.
- [17] 0335470A2, Method and apparatus for measuring wall erosion.
- [18] <http://www.nmlindia.org/download/BF/NDT.htm>
- [19] S. P. Sagar, A. Prakash, D. Bandyopadhyay, N. Parida, Feasibility of using ultrasonic technique to measure the blast furnace lining thickness, ATCOM 5-7 (2011).
- [20] A. Sadri, P. Gebiski, E. Shameli, Refractory wear and lining profile determination in operating electric furnaces using stress wave non-destructive testing (NDT), The Twelfth International Ferroalloys Congress, Helsinki, Finland (2010) 881-890.
- [21] <http://fa.wikipedia.org/wiki>
- [22] Ladle Refractory Monitoring Fixed Thermal Imaging Systems
- [23] <http://www.landinst.com/industries/iron-and-steel-making>
- [24] US6198293, Method and apparatus for thickness measurement using microwaves.
- [25] US4270051, Device for gauging thickness of refractory lining.
- [26] US 8269509B2, System and method for measuring thickness of a refractory wall of a gasifier using electromagnetic energy.