

به کارگیری حرارت‌نگاری مدوله شده جهت شناسایی عیوب در ورق‌های پلیمری

رضا خشکباری رضاییه^۱، محمدرضا فراهانی^{۲*}، مجید صفرآبادی^۳، سعید اصغری^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

۴- دانشیار، پژوهشکده مواد و انرژی

* mrfarahani@ut.ac.ir

چکیده

روش حرارت‌نگاری، یکی از روش‌های نوین، سریع و نسبتاً ارزان قیمت جهت انجام آزمون غیرمخرب می‌باشد. در این روش، قطعه کار مورد نظر توسط منبع گرمایی تحت گرمایش قرار می‌گیرد و تصاویر این فرآیند، توسط دوربین حرارتی ذخیره می‌گردند. در حرارت‌نگاری مدوله^۱، از اختلاف زمان انتقال حرارت در قطعه کار در منطقه سالم و معیوب استفاده می‌گردد. در این تحقیق، امکان‌سنجی انجام این روش بر روی قطعه کار پلاستیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان دادند که عیوب عمیق‌تر و کوچک‌تر، در تصویر حاصل از تحلیل دامنه موج گرمایی بهتر مشخص می‌شوند. همچنین مشخص گردید کیفیت تصاویر فازی نسبت به تصاویر دامنه بالاتر هستند و کمتر تحت تأثیر شرایط آزمایش همچون گرمایش نامتقارن و بازتابش نور قرار می‌گیرد. با بهینه‌سازی شرایط آزمایش، می‌توان با استفاده از تصاویر دامنه، عیوب رو به خوبی نمایش داد. همچنین از دو فرکانس متفاوت بافاصله نسبتاً زیاد 0.5 Hz و 1 Hz استفاده شد تا حدود مناسب فرکانس برای قطعه کار به دست آید. به دلیل انتقال حرارت مناسب، استفاده از فرکانس پایین‌تر در آزمایش توصیه می‌شود تا فاصله زمانی مناسب‌تری برای تشخیص عیوب وجود داشته باشد.

واژگان کلیدی: حرارت‌نگاری، مدوله شده، آزمون غیرمخرب، عیب، پلیمر.

۱- مقدمه

حرارت‌نگاری یکی از روش‌های نسبتاً جدید برای آزمون غیرمخرب انواع قطعات به شمار می‌رود. در این روش، قطعه کار تحت تأثیر گرمایش قرار می‌گیرد و تفاوت زمانی افزایش دمای قسمت سالم و قسمت معیوب قطعه کار، توسط دوربین حرارت‌سنج بررسی می‌شود. برای اولین بار حرارت‌نگاری برای انجام آزمون غیرمخرب توسط کارلومانگو^۲ و براردی^۳ انجام شد. آن‌ها تغییرات دمای سطح و توالی زمانی آن را بررسی کردند. آزمایش آن‌ها هم به صورت عددی و هم به صورت عملی انجام شد. نمونه‌های مورد آزمایش فولاد و پلی‌استر بودند. این محققین موفق شدند تا امکان‌پذیری حرارت‌نگاری را برای شناسایی عیوب داخل مواد و هندسه آن‌ها اثبات کنند.[۱]. حرارت‌نگاری

Lock-in یا مدوله نیز اولین بار در سال ۱۹۹۲ توسط بوزه^۴

و همکارانش معرفی شد. در این روش قطعه کار تحت گرمای دوره‌ای با استفاده از منبع مدوله سینوسی قرار می‌گیرد. دمای سطح نمونه با همان فرکانس منبع گرمایی تغییر می‌کند. دامنه و فاز سیگنال گرمایی سطح وابسته به خواص نمونه می‌باشد. منطقه معیوب و منطقه سالم سیگنال‌های بازگشتی متفاوتی خواهند داشت. ناپیوستگی‌های سطحی منجر به افزایش کنتراست فاز و دامنه سیگنال بازگشتی از سطح نسبت به سیگنال اولیه می‌شود. این ناپیوستگی‌ها می‌توانند هم تغییرات ساختار درونی و یا عیوب باشند.[۲]

یکی از مشکلات عمده این روش آزمون غیرمخرب، امکان‌سنجی انجام آن بر روی انواع قطعات می‌باشد. هدف

¹ Lock-in

² Giovanni Iviaria Carlomagno

³ Pier Giorgio Berardi

⁴ Busse

به دست آید. زمان انجام هر حرارت‌نگاری Lock-in به اندازه زمان انجام تصویربرداری گرمایی رادیومتری بر روی یک پیکسل می‌باشد.

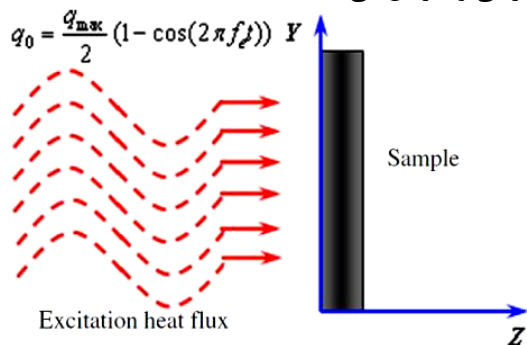
۲-۱- تئوری حرارت‌نگاری مدوله

اگرچه انواع موج متناوب در این روش قابل استفاده هستند، اما معمولاً از امواج سینوسی در حرارت‌نگاری مدوله استفاده می‌شوند. مزیت اصلی استفاده از امواج سینوسی این است که فرکانس و شکل موج بازگشتی محفوظ باقی می‌ماند و فقط ممکن است دامنه و تأخیر فاز موج تغییر کند. این اصل به وفاداری سینوسی مشهور است. موج متناوب به وسیله تابش در هوا منتقل می‌شود تا اینکه به سطح نمونه برسد، جایی که گرما تولید شده و از طریق ماده منتشر می‌گردد. عیوب داخل ماده به عنوان مانع انتشار حرارت عمل می‌کنند، که باعث تغییر دامنه و فاز سیگنال بازگشتی از سطح می‌شود. [۷]

شار حرارتی هارمونیک تحریک با یک معادله سینوسی متغیر زمانی n در حرارت‌نگاری Lock-in طبق معادله زیر نشان داده شده است: [۸]

$$q_0(t) = \frac{q_{\max}}{2} (1 - \cos(2\pi f_e t)) \quad (1)$$

که در آن $q_0(t)$ چگالی شار حرارتی، q_{\max} حداکثر چگالی شار حرارتی، f_e فرکانس مدولاسیون منبع حرارتی خارجی و t زمان می‌باشد.



شکل ۱- شار حرارتی خارجی اعمال شده بر جسم. [۷]

یک صفحه شفاف، همگن و نامحدود به ضخامت L در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل ۱ محیط اطراف صفحه هوا بوده و قسمت بزرگی از آن تحت تأثیر شار حرارتی قرار می‌گیرد. توزیع دمایی به دست آمده ناشی از هدایت در ماده توسط قانون فوریه به صورت زیر است:

کلی این تحقیق، بررسی پایه‌ای دانش انجام این آزمون غیرمخرب است. برای انجام هر آزمون غیرمخرب، ابتدا بایستی دانش اولیه و تئوری این روش از طریق مقالات و تحقیقات قبلی حاصل شود. سپس بایستی بر روی قطعه کاری با قابلیت انجام‌پذیری بالا انجام شود و نتایج صحیح و قابل اعتماد حاصل گردد. انجام اولیه آزمایش بر روی قطعات فلزی و یا کامپوزیت‌های گران قیمت عملی نیست؛ در نتیجه در این تحقیق، قطعه کاری پلاستیکی با انتقال حرارت مناسب و قابلیت تصویربرداری با کیفیت بالا مورد استفاده قرار گرفت. همچنین ایجاد عیوب در چنین موادی بسیار راحت‌تر و ارزان قیمت‌تر نسبت به قطعه‌کارهای فلزی می‌باشد.

۲- تئوری

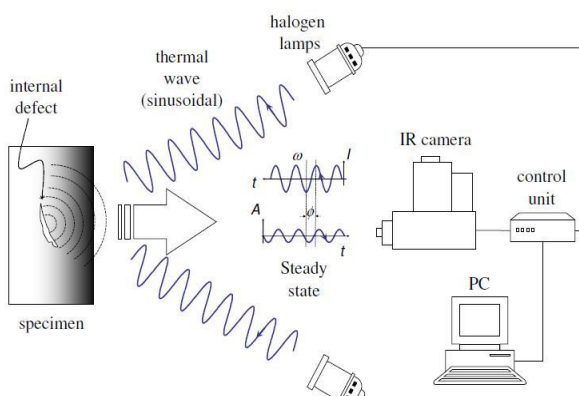
حرارت‌نگاری Lock-in که به عنوان حرارت‌نگاری مدوله^۵ نیز شناخته می‌شود [۳]، روشی است که از تصویربرداری گرمایی رادیومتری^۶ گرفته شده است [۴]. در روش تصویربرداری گرمایی رادیومتری، نقطه‌ای کوچک از سطح به صورت متناوب توسط پرتو لیزر تقویت شده مدوله، تحت تابش قرار می‌گیرد، تا امواج گرمایی از نمونه ساطع شود. پاسخ گرمایی به صورت هم‌زمان توسط شناساگر گرمایی ذخیره شده و به وسیله یک آمپلی‌فایر Lock-in تجزیه می‌گردد تا فاز و دامنه مدولاسیون به دست آید [۵]. روش تصویربرداری گرمایی رادیومتری یک روش شطرنجی نقطه‌به‌نقطه می‌باشد که نیازمند زمان طولانی است (به خصوص در مورد عیوب عمیق). علاوه بر این، سخت‌افزار بیرونی اضافی، برای مثال تقویت‌کننده Lock-in نیز برای به دست آوردن فاز و دامنه مورد نیاز است.

خوشبختانه، می‌توان با جایگزین کردن منبع حرارتی مدوله به جای لیزر و استفاده از شناساگر مادون قرمز به همراه یک دوربین که توانایی پوشش تمامی سطح را داشته باشد، و همچنین یک سخت‌افزار Lock-in به همراه یک نرم‌افزار مناسب که توانایی استخراج دامنه و طول موج را داشته باشد، این روش را آسان‌تر و کوتاه‌تر اجرا کرد. این همان حرارت‌نگاری Lock-in است [۶]. در واقع در حرارت‌نگاری Lock-in، تحلیل بر روی هر پیکسل از مجموعه تصاویر به دست آمده اعمال می‌شود تا دامنه و فاز

^۶ Photothermal Radiometry

^۵ Modulated

شکل ۲ طرح آزمایش حرارت‌نگاری مدوله با منبع نوری را مشخص می‌کند. در تصویر دو لامپ نشان داده شده است، در حالی که می‌توان از چندین لامپ برای کاهش ناهمگن بودن گرمایش و افزایش انرژی ارسالی به سطح استفاده کرد. لامپ‌ها امواج متناوب گرمایی را در فرکانس مدوله مشخص (ω)، حداقل برای یک دوره تناوب، و به صورت ایدئال تا زمانی که حالت پایدار به دست آید، ارسال می‌کنند. البته در عمل، فقط چندین دوره برای به دست آوردن فاز و دامنه موردنیاز است و تا قبل از رسیدن به حالت پایدار می‌توان به آن رسید.



شکل ۲ طرح آزمایش حرارت‌نگاری مدوله با تحریک نوری [۹].

۲-۳- تحلیل اطلاعات حرارت‌نگاری

امواج گرمایی بازگشتی بر اساس دامنه، فاز و فرکانس زاویه‌ای (A, ω, φ) شناسایی می‌شوند. اصل شناسایی عیب این است که مناطق معیوب موجب تأخیر در فاز می‌گردند. اطلاعات فاز و دامنه به وسیله تحلیل تصاویر گرمایی ذخیره شده برای هر پیکسل در حالت دوبعدی تحلیل و سپس به تصاویری بانام تصویر فازی و تصویر دامنه تبدیل می‌شود. تصویر دامنه افزایش دمای کل سیستم را در طی چرخه تغییر قدرت نشان می‌دهد و تصویر فاز نشان‌دهنده تأخیر زمانی بین نیروی دستگاه و گرمایش بعدی بر روی سطح می‌باشد. تصاویر دامنه به صورت کمی اندازه‌گیری می‌شوند تا شکل و اندازه نقص و فاز تصویر را برای عمق نقص به دست آورند. دو الگوریتم اصلی تحلیل اطلاعات در ادامه توضیح داده می‌شوند.

$$\frac{\partial^2 T(Z, t)}{\partial Z^2} = \frac{k}{\rho c} \frac{\partial T(Z, t)}{\partial t} \quad (2)$$

که در آن T(Z, t) دما، k رسانایی گرمایی، ρ چگالی، c ظرفیت گرمایی ویژه و Z مختصات فضایی می‌باشد. زمانی که جسم جامد گرم می‌شود، شار گرمایی را می‌توان به دو قسمت در نظر گرفت: قسمت ثابت شار گرمایی q_{max}/2 که باعث افزایش دما می‌شود؛ و قسمت هارمونیک شار گرمایی q_{max}/2 × cos(2πf_et) که مدولاسیون هارمونیک گرمایی را موجب می‌شود. حل T(Z, t) با در نظر گرفتن شرایط مرزی در نمونه تحت تابش در سطح آن (Z = 0) و طرف دیگر آن (Z = L) می‌باشد. حل حالت پایا T(Z, t) به صورت معادله زیر می‌باشد: [۹]

$$T(Z, t)_s = A_s \exp\left(-Z \sqrt{\frac{i2\pi f_e \rho c}{k}}\right) \exp(i2\pi f_e t) \\ = A_s \exp\left(\frac{-Z}{\Lambda}\right) \exp\left[i\left(2\pi f_e t - \frac{Z}{\Lambda}\right)\right] \quad (3)$$

که T(Z, t) توزیع دمایی هارمونیک در حالت پایا، A_s دامنه دمایی هارمونیک، و $\Lambda = \sqrt{\frac{k}{\pi f_e \rho c}}$ نشانگر طول نفوذ دمایی می‌باشد.

تغییرات دمایی در حالت گذرا با T(Z, t)_t نشان داده می‌شود و از معادله دیفرانسیل جزئی تبعیت می‌کند:

$$\rho c \frac{\partial T(Z, t)_T}{\partial t} = \frac{q_{max}}{2} - \frac{T(Z, t)_T - T_{am}}{R_{th}} \quad (4)$$

که در آن T_{am} دمای محیط و R_{th} مقاومت گرمایی نمونه است. حل گذرا برای T(Z, t)_T در معادله (۴)، به صورت زیر می‌باشد:

$$T(Z, t)_T = T_{am} + \Delta T(1 - e^{-t/\tau}) \quad (5)$$

که در آن، τ ثابت زمانی نام دارد. همچنین $\Delta T = q_{max}/2 \times R_{th}$ پس از حل معادلات ۳ و ۵، T(Z, t) به صورت زیر به دست آمده می‌آید:

$$T(Z, t) = T(Z, t)_T + T(Z, t)_s \quad (6)$$

۲-۲- انواع تحریک قطعه کار

حرارت‌نگاری Lock-in از لحاظ منبع تحریک به دودسته تقسیم‌بندی می‌شود. به دلیل این که تحریک بایستی به صورت مدوله اعمال شود، یعنی امواج قابل کنترل باشد، منبع تحریک به دو صورت نوری و یا اولتراسونیک استفاده می‌شود. نحوه ایجاد حرارت در قطعه کار متفاوت است.

رگرسیون حداقل مربعات مطابقت داده و از این داده‌های مصنوعی برای محاسبه دامنه و فاز استفاده کرد [۱۰]. این دو جایگزین باعث کاهش سرعت محاسبات می‌شوند.

۲-۳-۲- روش تبدیل فوریه گسسته^۹

روش تبدیل فوریه سریع یک ابزار قوی و محبوب برای محاسبه دامنه و زاویه فاز موج گرمایی هارمونیک می‌باشد. این روش برای محاسبه دامنه و فاز به صورت off-line مورد استفاده قرار می‌گیرد. تبدیل فوریه توالی تصاویر گرمایی نشان داده شده در معادله (۱۰)، در فرکانس f_e که فرکانس مدوله نامیده می‌شود به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_K(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[F_n(x, y) \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi Kn}{N}\right) \right]$$

$$= \sum_{n=0}^N \left[F_n(x, y) \cdot W_N^{(n-1)(K-1)} \right] W_N$$

$$= \exp\left(-j \frac{2\pi}{N}\right)$$

$$K = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

که در آن $F_K(x, y)$ تبدیل فوریه توالی تصاویر گرمایی، $F_n(x, y)$ توالی تصاویر، N تعداد نمونه‌ها در دوره lock-in و K فرکانس دیجیتال است.

برای استخراج موج گرمایی در فرکانس lock in فرکانس دیجیتال K به صورت زیر به دست می‌آید: [۱۱]

$$K = N \frac{f_e}{f_s} + 1 \quad (11)$$

که در آن f_s نرخ فریم است. دامنه و زاویه فاز موج گرمایی به صورت زیر به دست می‌آید که A_s دامنه موج گرمایی و φ ، زاویه فاز آن می‌باشد: [۱۲]

$$A_s = \sqrt{[\operatorname{Re}(F_K(x, y))]^2 + [\operatorname{Im}(F_K(x, y))]^2} \quad (12)$$

$$\varphi = a \tan\left(\frac{\operatorname{Im}(F_K(x, y))}{\operatorname{Re}(F_K(x, y))}\right) \quad (13)$$

روش DFT می‌تواند با هر نوع شکل موجی به کار رود (حتی سیگنال‌های گذرا مانند حرارت‌نگاری فاز پالسی و فاز پشت سر هم ویبروحرارت‌نگاری) و می‌تواند سیگنال را حذف نویز کند. با وجود مزایای بسیار، این روش کند است. خوشبختانه، الگوریتم تبدیل فوریه سریع (FFT) در

^۹Discrete Fourier Transforms method

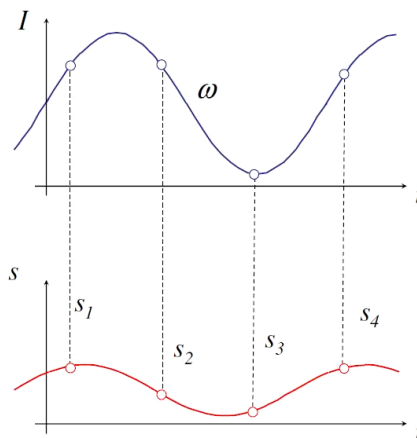
۲-۳-۱ روش همبستگی چهار نقطه^۷

روش چهار نقطه برای شبیه‌سازی سینوسی در شکل ۳ نشان داده شده است [۶]، [۹]. این روش برای اولین بار در سال ۱۹۹۲ توسط بوزه^۸ ابداع گشت [۹]. اگر تمامی سطح قطعه کار تحت بازرسی با موج سینوسی تحریک شود، موج حرارتی در تمامی ماده منتشر می‌شود. حرارت‌نگاری تمامی اجزای سطح را بررسی می‌کند. این روش از چهار نقطه هم فاصله بر روی موج گرمایی استفاده می‌کند. سیگنال ورودی سینوسی I ، در بالای شکل و سیگنال پاسخ S در پایین شکل نشان داده شده است.

تأخیر در تشخیص عناصر پیوسته در سطح برابر است با تأخیر فاز نسبت به تابع مرجع سینوسی که موج حرارتی را ایجاد می‌کند. در حین چرخه مدولاسیون، فقط چهار اسکن برای تمامی پیکسل‌های سطح مورد نیاز است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، ورودی و خروجی در هنگام استفاده از موج سینوسی شکل یکسانی دارند، و فقط تفاوت در دامنه و فاز است که توسط فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$A = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 + (S_2 - S_4)^2} \quad (8)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{S_1 - S_3}{S_2 - S_4}\right) \quad (9)$$



شکل ۳ روش چهار نقطه برای محاسبه دامنه و تأخیر فاز در حرارت‌نگاری مدوله. [۹]

روش چهار نقطه سریع است ولی فقط برای تحریک با امواج سینوسی مورد تأیید بوده و تحت تأثیر نویز قرار می‌گیرد. سیگنال می‌تواند به وسیله میانگین‌گیری از چندین نقطه و افزایش تعداد چرخه‌ها، بهتر حذف نویز شود. [۸] روش دیگر این است که داده‌های تجربی را با استفاده از

^۷ Four-point correlation method (FPCM)

^۸ Busse

هندسه جسم، سطح ظاهری جسم و دمای آن با شدت های مختلفی انتشار می یابد که این قدرت انتشار امواج مادون قرمز با ضریبی به نام ضریب تشعشع یا ϵ مشخص می شود.

بر خلاف تصور دوربین های ترموگرافی، دما را اندازه گیری نمی کنند، بلکه این دوربین ها امواج مادون قرمز را با توجه به شدت انتشار دریافت کرده و بر اساس تنظیمات اپراتوری و داخلی از قبیل دمای محیط، ضریب تشعشع و فاصله تا هدف، محاسباتی را انجام داده و نتیجه را به صورت دما ارائه می دهند. پس در اولین گام باید توجه داشت که گاهی مشاهده دماهای غیر منطقی در بازرسی، صرف نظر از وضعیت کالیبراسیون دوربین ممکن است در تنظیم پارامترها خطایی رخ داده باشد. نکته دیگر اینکه بر خلاف برخی تصورات، دوربین های ترموگرافی هرگز نمی توانند درون اجسام را ببینند. باید گفت که با توجه به سطح انرژی امواج مادون قرمز در گستره الکترومغناطیسی، این امواج سطح انرژی پایینتری نسبت به امواج مرئی داشته و حتی از بیشتر اجسام شفاف نیز عبور نمیکنند. با مثالی ساده می توان بیان داشت که نور از شیشه عبور می کند اما از دیوار عبور نمی کند، حال آنکه امواج مادون قرمز با توجه به سطح انرژی پایینتر از امواج مرئی از هیچ جسم صلبی عبور نمی کنند. تنها تعداد اندکی از مواد هستند که امواج مادون قرمز را از خود عبور می دهند که از جمله آنها می توان به فلز ژرمانیوم اشاره کرد. از این رو از این فلز برای ساختن لنز دوربین های ترموگرافی استفاده می شود.

همچنین در برخی موارد نیاز به مشاهده درون یک باکس یا تابلو برق و ... می باشد که در این موارد خاص می توان از پنجره های مادون قرمز که از فلز ژرمانیوم ساخته می شوند استفاده کرد و با تعبیه کردن این پنجره ها در پوسته جسم مورد نظر درون آن جسم با دوربین ترموگرافی قابل مشاهده می شود.

در نهایت این دوربین ها با توجه به محدوده طیفی امواج مادون قرمز به سه دسته باند کوتاه (SW)، باند متوسط (MW) و باند بلند (LW) تقسیم بندی میشوند. محدوده ۰ تا ۲ میکرومتر SW، ۲ تا ۵ میکرومتر MW و ۵ تا ۷ میکرومتر LW نامیده می شود. دوربین های معمول ترموگرافی تنها قادر به نمایش گراف حرارتی سطوح جامد

دسترس است و در بسیاری از نرم افزارها قابل دسترسی است [۱۳].

۳- انجام آزمایش

برای انجام آزمایش، از قطعه کاری از جنس $PTFE^{10}$ استفاده شد. ابعاد قطعه کار مورد استفاده 30×15 سانتی متر و ضخامت آن ۲ سانتی متر بود. دو ردیف سوراخ در قطعه کار ایجاد شد. هر ردیف دارای سه سوراخ بود که قطر آنها به تدریج کاهش پیدا می کند. قطر سوراخ ها در هر ردیف ۱۰، ۵ و ۲ میلی متر بوده و عمق ردیف اول ۱۵ میلی متر و ردیف دوم ۱۰ میلی متر بود. فاصله مرکز هر سوراخ تا سوراخ بعدی در هر طرف ۲۰ میلی متر بود. نوع سوراخ نیز Flat Bottom است. به منظور کاهش گرمای بازتابی از سطح قطعه کار که تقریباً سفید بود، از رنگ سیاه مات استفاده گردید. سطح قطعه کار به صورت یکنواخت با یک لایه به ضخامت کم رنگ آمیزی شد.

اصلی ترین عضو در بازرسی حرارتی، حسگر حرارتی است. حسگرها به دو گروه اصلی دسته بندی می شوند: حسگرهای گرمایی و حسگرهای کوانتوم (یا فوتون). از منظر نحوه کاربرد می توان حسگرهای مادون قرمز را به دو نوع سرد و غیرسرد تقسیم بندی نمود. حسگرهای سرد، به خنک سازی مناسبی در پایین تر از دمای محیط برای اسکن سریع، حساسیت بالا و نویز پایین نیاز دارند. در گذشته حسگرها را در دیواره یک بطری دو جداره که با نیتروژن مایع پر شده بود، قرار می دادند. سیستم های نسل جدید شامل خنک ساز کوچکی هستند که بر اساس اثر ترموالکتریک پلیته یا سیکل استرلینگ ساخته می شوند و هیچ نیازی به منبع خنک سازی خارجی ندارند. حسگرهای مادون قرمز غیر سرد، در دمای محیط کار می کنند یا در دمای نزدیک به محیط از اجزاء کنترل دما استفاده می کنند. این حسگرها به طور کلی به وسیله تغییر خاصیت مواد (مقاومت، ولتاژ و یا جریان) در هنگامی که توسط تشعشع مادون قرمز گرم می شوند، کار می کنند. این تغییرات سپس با مقادیر دمای کاری حسگر اندازه گیری و مقایسه می شوند.

در طبیعت هر جسمی که دمایی بالاتر از صفر مطلق یا ۲۷۳- درجه سلسیوس داشته باشد از خود امواج مادون قرمز منتشر می کند. این امواج بسته به ماهیت ساختاری جسم،

¹⁰ Polytetrafluoroethylene



شکل ۴ ستاپ انجام آزمایش

۴- تحلیل و بررسی نتایج

آزمایش به سه صورت انجام شد. ابتدا لامپها و دوربین در یک طرف قطعه کار قرار داده شدند و گرم و سرد شدن قطعه کار مورد بررسی قرار گرفت. سپس یکی از لامپها خاموش شده و آزمایش مجدداً تکرار شد. در مرحله آخر، لامپها به پشت قطعه کار انتقال داده شدند و تصاویر گرمایش قطعه کار و سرد شدن آن مورد بررسی قرار گرفتند. تحلیل نتایج تصاویر به دست آمده توسط گد نوشته شده در نرم افزار متلب^{۱۲} انجام شد. تصاویر به روش فوریه سریع مورد مورد تحلیل قرار گرفتند. با مقایسه شکل ۵ و ۷ که در آنها تعداد لامپهای مورد استفاده متفاوت است، مشخص می شود که گرمایش با استفاده از دو لامپ و به صورت متقارن، عیوب را بهتر به نمایش می گذارد. همانگونه که مشخص است، در شکل ۷ که در آن از یک لامپ برای گرمایش استفاده شده است، فقط عیوب با عمق زیاد قابل رویت است.

مقایسه تصاویر ۵ و ۶ که در آنها قطعه کار هنگام گرم شدن و سرد شدن مورد بررسی قرار گرفته است، مشخص می کند می توان از مرحله سرد شدن قطعه کار نیز برای شناسایی عیوب استفاده کرد. این مقایسه در شکل های ۸ و ۹ به صورت بهتر صورت می گیرد. مشخص است که هنگام استفاده از منابع حرارتی در پشت قطعه کار، در هنگام سرد شدن عیوب به خوبی قابل مشاهده می باشند.

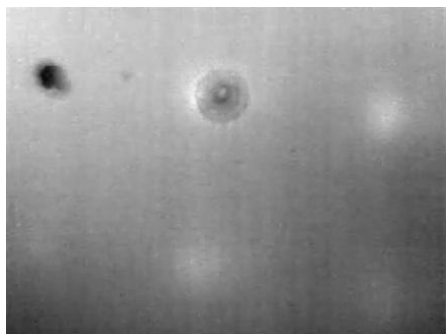
در پایان نیز با استفاده از مقایسه دو تصویر ۵ و ۸، مشخص می شود در صورتی که منابع حرارتی در پشت

و مایع هستند و در حالت طبیعی طیف حرارتی گازها با این دوربینها قابل مشاهده نیست. برای مشاهده نشستی گازها و طیف حرارتی گازها، باندهای طیفی دوربینها را محدود می کنند و بدین منظور می بایست از دوربین های مخصوص شناسایی گاز استفاده شود. برای انجام آزمایش حرارت نگاری در این پژوهش، از دوربین FLIR IR- Thermocam با وضوح تصویر ۶۴۰*۴۸۰ استفاده شد. دوربین در فاصله ۱۵ سانتی متری از قطعه کار قرار داده شد. دوربین دقیقاً در مقابل قطعه کار و بدون زاویه قرار گرفت. از دو لامپ هالوژنی 1000 W برای گرمایش قطعه کار استفاده شد. این لامپها با زاویه ۴۵° نسبت به قطعه کار قرار گرفتند تا تأثیر بازتاب آن در تصویر دوربین به حداقل برسد. لامپها در چند دوره در پشت و جلوی قطعه کار قرار گرفتند و گرم شدن و سرد شدن آن مورد بررسی قرار گرفت. برای ایجاد گرمایش سینوسی، یک اینورتر^{۱۱} به عنوان منبع تغذیه لامپ هالوژنی مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۴، چگونگی انجام آزمایش را نشان می دهد.

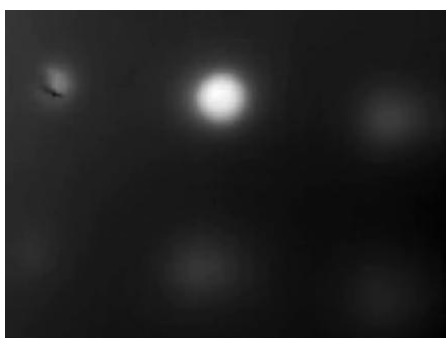
در بیشتر مقالات مطالعه شده در این زمینه، زاویه دوربین به صورت عمود بر سطح قطعه کار می باشد. دلیل اصلی این موضوع، این است که فاصله تمامی نقاط سطح مورد بررسی از قطعه کار، در حد امکان، نسبت به دوربین یکسان باشد. فرکانسهای مورد استفاده به دلیل انتقال حرارت مناسب قطعه کار، 1 Hz و 0.5 Hz انتخاب گردید تا فرکانس بهینه به دست آید. سیکل اعمال حرارت و سپس سرد شدن قطعه کار که یک دقیقه به طول انجامید، توسط دوربین حرارتی ذخیره گردید. در واقع ۶ دوره تناوبی گرمایش به مدت 30 s بر روی قطعه کار انجام شد. سطحی که با چشم غیرمسطح از سمت دوربین قابل رویت می باشد، روی قطعه کار و سطح دیگر، پشت قطعه کار است. در واقع جهت سطوح نسبت به ناظر پشت دوربین تعریف می شود.

¹² Matlab

¹¹ Inverter



شکل ۸ تصویر فازی عیوب قطعه کار در هنگام گرمایش با دو لامپ از پشت



شکل ۹ تصویر فازی عیوب قطعه کار در هنگام سرد شدن با دو لامپ از پشت

۵- نتیجه گیری

با توجه به شناسایی عیوب، به نظر می‌رسد مراحل تئوری و عملی حرارت‌نگاری به خوبی طی شده و آماده انجام آزمون‌های اصلی می‌باشد. همچنین مشخص شد که تصاویر دامنه دقت بهتری دارند، ولی تصاویر فازی کیفیت بسیار بالاتری داشته و کمتر تحت تأثیر شرایط آزمایش قرار می‌گیرند. پس بهتر است با افزایش کیفیت رنگ‌آمیزی قطعه کار و بهبود شرایط انجام آزمایش، با توجه به تصاویر دامنه، عیوب زیرسطحی بررسی شوند.

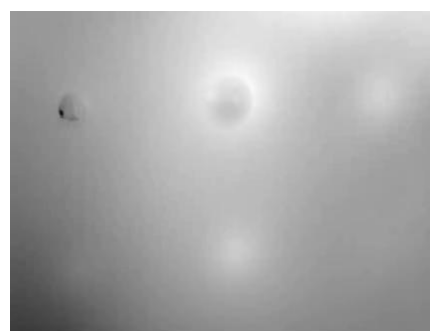
همچنین همان‌گونه که نتایج دو فرکانس متفاوت نشان می‌دهند، پیشنهاد می‌شود برای آزمایش هر قطعه کاری، از چندین فرکانس متفاوت استفاده شود تا فرکانس بهینه برای انجام آزمایش بر روی قطعه کار مورد نظر به دست آید. در این نوع پلاستیک، به نظر می‌رسد فرکانس 0.2 Hz فرکانس مناسبی برای انجام آزمایش حرارت‌نگاری مدوله باشد.

برای بهبود کیفیت تصاویر و حذف گرمایش نامتقارن، استفاده از دو لامپ با منبع تغذیه یکسان بهتر از استفاده از

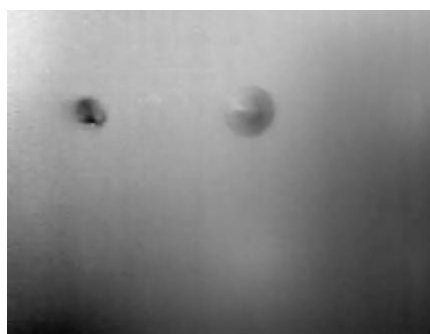
قطعه کار قرار گیرند، می‌توان به کیفیت بهتری دست پیدا کرد.



شکل ۵ تصویر فازی عیوب قطعه کار در هنگام گرمایش با دو لامپ از روبرو



شکل ۶ تصویر فازی عیوب قطعه کار در هنگام سرد شدن با دو لامپ از روبرو



شکل ۷ تصویر فازی عیوب قطعه کار در هنگام گرمایش با یک لامپ از روبرو

[7] Favro L. D. and Han X, "Thermal Wave Materials Characterization and Thermal Wave," in Sensing for Materials Characterization, Processing and Manufacturing, ASNT TONES, 1998, pp. 399-415.

[8] J. Liu, W. Yang, and J. Dai, "Research on thermal wave processing of lock-in thermography based on analyzing image sequences for NDT," *Infrared Phys. Technol.*, vol. 53, no. 5, pp. 348-357, 2010.

[9] G. Busse, D. Wu, and W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," *J. Appl. Phys.*, vol. 71, no. 8, pp. 3962-3965, 1992.

[10] C. Krapez, "Compared performances of four algorithms used for modulation thermography," *QIRT, Eurotherm Semin.* 60, no. April, 1998.

[11] W. Y. Junyan Liu, Jingmin Dai, "An IR Lock-in Thermography Nondestructive Test System Based on the Image Sequence Processing," in *17WCNDT*, 2008.

[12] Bracewell R., *the Fourier Transform and its Applications*. USA: McGraw-Hill, 1965.

[13] J. W. Cooley and J. W. Tukey, "An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series," *Math. Comput.* vol. 19, no. 90, p. 297, 1965.

یک لامپ است. همان گونه که از تصاویر مشخص است، یک قسمت با کیفیت بهتری تصویربرداری شده است.

۶- منابع

[1] I. Aerodinamica and N. Naples, "IRIE' 76 UNSTEADY THERMOTOPOGRAPHY IN NON-DESTRUCTIVE TESTING Giovanni IVIaria Carlomagno and Pier Giorgio Berardi," vol. 15, no. 1, 1976.

[2] G. Busse, D. Wu, and W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," *J. Appl. Phys.*, vol. 71, no. 8, pp. 3962-3965, 1992.

[3] G. Giorleo and C. Meola, "Comparison between pulsed and modulated thermography in glass-epoxy laminates," *NDT E Int.*, vol. 35, no. 5, pp. 287-292, 2002.

[4] Nordal P. E. and Kanstand S. O, "Photothermal radiometry," *Phys. Scr.*, vol. 20, pp. 659-662, 1979.

[5] G. Busse, "Techniques of infrared thermography," in *Nondestructive Handbook, Infrared and Thermal Testing*, 2001.

[6] D. Wu and G. Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," *Rev. Gen. Therm.*, vol. 37, pp. 693-703, 1998.

Using of Modulated Thermography for Nondestructive Testing of Polymer Plates

Reza Khoshkbery Rezayiye¹, Mohammadreza Farahani^{2*}

¹ MSc. student, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran,

^{2,*} Associate professor, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, mrfarahani@ut.ac.ir

Abstract:

Thermography is one of the new, fast and low-cost methods for nondestructive testing. In this method, the workpiece is subjected to heating under the modulated heat source, and the images of the process are stored by the thermal camera. In this research, the feasibility of this method was performed on a plastic cutter. The results showed that deeper and smaller defects are better identified in the image of the amplitude of the heat wave amplitude. It was also found that the quality of phase images is higher than the image of the domain and is less affected by the test conditions, such as asymmetric heating and light reflection. By optimizing the test conditions, the defects can be displayed with the use of domain images. Also, two different frequencies with a relatively high spacing of 0.5 Hz and 1 Hz were used to obtain a suitable frequency for the workpiece. Due to the appropriate heat transfer, lower frequency use in the test is recommended to provide a more appropriate time interval for detecting defects.

Keywords: Thermography, Nondestructive Test, Plastic, Frequency, Defect