

بررسی روش تداخل سنجی برشی در تشخیص عیوب در مواد مختلف

فرزاد بناکار^{۱*}، داود اکبری^۲

^۱ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران

^۲ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران

* F.banakar@modares.ir

چکیده

روش تداخل سنجی برشی یا برش نگاری، یکی از روش‌های نوری غیرتماسی و تمام-ناحیه برای ارزیابی غیرمخرب قطعات و مجموعه‌ها می‌باشد. در این روش گرادیان جابه‌جایی سطح به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. پس از پردازش تصویر، الگوهای هاله‌ای سطح تحت بارگذاری بدست می‌آید. از این روش به طور عمده در پیدا کردن عیوب سطحی و زیر سطحی در قطعات استفاده می‌شود. سایر کاربردهای برش نگاری شامل اندازه‌گیری کرنش، شناسایی خواص مواد، ارزیابی تنش‌های پسماند، تشخیص نشی، مطالعه ارتعاشات سازه و اندازه‌گیری‌های سه بعدی می‌باشد. به دلیل اندازه‌گیری مستقیم گرادیان‌های جابه‌جایی و حساس نبودن به ارتعاشات محیط، برش نگاری علاوه بر محیط‌های آزمایشگاهی، کاربرد بسیار گسترده‌ای در محیط‌های صنعتی دارد که این ویژگی باعث تمایز این روش با سایر روش‌های نوری شده‌است. از این روش بیشتر در شناسایی عیوب قطعات مواد مرکب و فلزی استفاده می‌شود. در این مقاله به بررسی تکنیک‌ها، تجهیزات، نحوه‌ی عملکرد، پردازش تصاویر، نوع بارگذاری با توجه به جنس قطعه و نوع عیب با تاکید بر چند پژوهش کاربردی در این زمینه، پرداخته شده‌است.

واژگان کلیدی: تداخل سنجی برشی، ارزیابی غیرمخرب، اندازه‌گیری کرنش

۱- مقدمه

با توجه به پیشرفت‌های تکنولوژی در سال‌های اخیر و استفاده از قطعات و مجموعه‌های حساس و پیشرفته، لزوم وجود روش‌های بازرسی غیرمخرب برای تشخیص عمر باقی‌مانده‌ی قطعات و همچنین تشخیص وجود یا عدم وجود عیب و ناپیوستگی در آنها بیش از پیش حس می‌شود. روش‌های قدیمی و بازرسی‌های مخرب، به قطعه آسیب وارد می‌کنند و در مواردی که نیاز به سالم نگه داشتن قطعه است، نمی‌توان از این روش‌ها استفاده کرد. از طرفی بارگذاری‌های خستگی نیز می‌تواند به مرور زمان عیوب و ترک‌های ریز را گسترش داده و منجر به ناکارآمدی مجموعه و قطعه‌ها بشود. از این رو انجام آزمون‌های غیرمخرب در تمام مراحل طراحی، ساخت و نگهداری مجموعه از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد [۱].

طی سال‌های اخیر تجهیزات و روش‌های گوناگونی برای بررسی و آزمون‌های غیرمخرب به وجود آمده و گسترش یافته است. هر کدام از این روش‌ها بر اساس مجموعه‌ای از پارامترها برای بررسی و انجام آزمون انتخاب می‌شوند. از جمله این پارامترها می‌توان به جنس قطعه، نوع عیوب

احتمالی، محدودیت‌های دسترسی به قطعه یا مجموعه، قابل حمل بودن تجهیزات، ملاحظات اقتصادی، سرعت انجام بازرسی و ... اشاره نمود [۲]. یکی از روش‌های نوین و کارآمد در زمینه‌ی آزمون‌های غیرمخرب، روش تداخل سنجی برشی و یا در اصطلاح، برش نگاری است که بر پایه‌ی تداخل موج لیزر تک‌رنگ بازتابی از سطح جسم می‌باشد. کاربردهای زیادی می‌توان برای این روش ذکر کرد از جمله: اندازه‌گیری ابعادی، تعیین عیوب و لایه لایه شدن‌های زیر سطحی، تعیین میزان تنش‌های پسماند، بررسی ویژگی‌های میکروساختاری، تعیین خواص مواد و خواص مکانیکی. دو کاربرد بسیار موفق روش برش نگاری در صنعت تایر سازی برای تشخیص عیوب مختلف تایرها و در مواد مرکب و ساختارهای پلیمری برای تشخیص لایه لایه شدن و وجود حفره و ترک در آنها می‌باشد [۳].

کرنش و پارامترهای مرتبط با آن، از ویژگی‌های خاص یک نمونه می‌باشند که اندازه‌گیری آنها می‌تواند کمکی بزرگ برای شناسایی درست ویژگی‌های قطعه نماید. روش برش-نگاری دیجیتال قادر است کرنش‌های سطحی بخشی از جسم را که در معرض تابش نور لیزر قرار گرفته‌است، نمایان

دو ورق نازک آلومینیوم-مس را توسط روش برش‌نگاری، به کمک بارگذاری حرارتی مورد بررسی قرار دادند و به خوبی توانستند مکان‌های جوش نخورده و جدا شده را تشخیص دهند. سوچاتا و همکاران [۸] با بررسی سه سطح انحنای دار از جنس مواد مرکب آلومینیوم و پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن که دارای عیوب مشخص بودند، به این نتیجه رسیدند که روش برش‌نگاری، محدود به سطوح صاف و مسطح نمی‌باشد و می‌تواند سطوح داخلی و خارجی قطعات دارای انحنای مانند لوله‌ها و پروفیل‌ها را بازرسی کند. اکبری و همکاران [۹] پارامترهای موثر در روش برش‌نگاری را برای تشخیص ترک روی مواد مرکب را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پارامتری بعدی به نام ضریب بار را برای توصیف حالت بارگذاری در منطقه‌ی کشسان تعریف کردند و بازرسی را برای حالت‌های مختلف این ضریب انجام دادند. علاوه بر این، اثر اندازه‌ی برش و زاویه‌ی قرارگیری ترک را مورد بررسی قرار دادند. ژانگ و همکاران [۱۰] از بارگذاری ارتعاشی به کمک پیزوالکتریک برای تشخیص ترک روی نمونه‌های فلزی استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند زمانی بهترین نتایج بدست می‌آید که فرکانس ارتعاشات، به فرکانس تشدید پیزوالکتریک نزدیک باشد و با این بارگذاری بهینه توانستند ترک‌هایی به عمق ۱۰ میلی‌متر را در نمونه‌های آلومینیومی، تشخیص دهند.

در این مقاله به بررسی کامل چیدمان، تئوری و پارامترهای اساسی روش برش‌نگاری دیجیتال پرداخته شده است. در انتها، تعدادی از مهمترین پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه، به طور کامل بررسی شده اند.

۲- تجهیزات و چیدمان برش‌نگاری

در روش برش‌نگاری دیجیتال، از تداخل‌گر مایکلسون^۱ برای ایجاد برش در تصاویر استفاده می‌شود. در ابتدا نمونه‌ای از قطعه کار که تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، تهیه می‌شود و در مکان خود محکم می‌شود. لیزر تک رنگ که در جلوی آن از لنز واگرا کننده برای گسترش نور قرار داده می‌شود، برای روشن کردن سطح قطعه استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری به کمک روش برش‌نگاری، سطح مورد مطالعه می‌بایست از لحاظ نوری، زبر باشد. پرتو لیزر به سطح

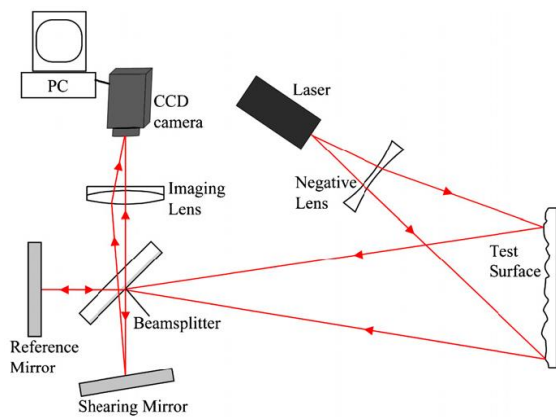
سازد. از آنجا که با بارگذاری در قطعات، معمولاً در نواحی اطراف عیوب (نظیر انواع ترک‌ها) تمرکز کرنش ایجاد می‌شود، می‌توان با اندازه‌گیری کرنش‌های سطحی و تعیین تغییرات و محل‌های تمرکز آنها در بخش‌های مختلف جسم، عیوب را شناسایی و اندازه‌گیری نمود. از طرفی از آنجا که در روش برش‌نگاری، کرنش‌ها به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شوند، حساسیت شناسایی عیب حتی نسبت به سایر روش‌های نوری نیز بیشتر است. از جمله محدودیت‌های این روش می‌توان به عدم شناسایی عیوب در عمق قطعه اشاره کرد [۴]. پیش از برش‌نگاری از روش‌هایی همچون تداخل-سنجی الگوی لکه‌ای الکترونیکی (ESPI) و هولوگرافی^۲ استفاده می‌شد. در روش هولوگرافی، تصاویر برش خورده‌ی تداخلی بر روی فیلم‌های هولوگرافی ثبت می‌شود. روش ESPI و هولوگرافی از لحاظ چیدمان، مشابه با روش برش-نگاری می‌باشند تنها با این تفاوت که در ESPI و هولوگرافی یک پرتوی نور مرجع باید به طور مستقیم از لیزر به دوربین وارد شود که باعث حساس شدن سیستم به ارتعاش و اختلال‌های محیط می‌شود. به همین دلیل برای از بین بردن این عیب، روش برش‌نگاری پیشنهاد شد به نحوی که در این روش دو پرتو نور بازتاب شده از سطح قطعه دریافت می‌شود، بنابراین حساسیت به نویز تا حد قابل توجهی کاهش می‌یابد [۵].

ز روش تداخل‌سنجی برش‌نگاری، نخستین بار برای اندازه‌گیری ممان خمشی در تیر توسط لیندرتز و باترزدر سال ۱۹۷۳، استفاده شد. در اوایل سال ۱۹۸۰ میلادی با تلاش‌های سه محقق، جان بوترز در انگلستان و ناکادات در ژاپن و مایکهنگ در آمریکا از دوربین الکترونیکی و تصاویر دیجیتالی استفاده شد که بعد از آن با اختراع دوربین مخصوص برش‌نگاریبه عنوان یک روش بازرسی غیرمخرب معرفی شد و اولین بار در سال ۱۹۸۷ روی بمب افکن USAF B2 بازرسی انجام شد [۶]. پژوهش‌هایی نیز در زمینه‌ی تشخیص عیوب به کمک روش برش‌نگاری صورت گرفته که بیشتر بر روی عیوب بین لایه‌ای مانند: ایجاد حفره بین لایه‌ها و جدایش بین لایه‌ای متمرکز بوده اند و تشخیص ترک‌های زیرسطحی، نیاز به بررسی بیشتری دارد. جیا و همکاران [۷] کیفیت جوش فراصوتی ایجاد شده بر روی

¹ Electronic speckle pattern interferometry

² Holography

³ Michelson interferometer



شکل ۱. شماتیک سیستم برش‌نگاری بر پایه‌ی تداخل‌سنجی برشی مایکلسون. این تجهیزات برای اندازه‌گیری مشتق‌های جابه‌جایی در خارج صفحه می‌باشد. [۱۲]

۳- تئوری برش‌نگاری

شدت پرتو بازتاب شده از سطح و ثبت شده توسط صفحه دوربین ناشی از دو تصویر برش خورده قبل از بارگذاری I می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I = I_0(1 + \mu \cos \theta) \quad (1)$$

I_0 شدت نور متوسط زمینه، μ اندازه مدول تداخل، θ زاویه فاز تصادفی می‌باشد. بعد از اینکه بارگذاری انجام شد و جسم تغییر شکل یافت، توزیع شدت الگوی نقطه‌ای به آرامی تغییر می‌کند و به I' تبدیل می‌شود که توسط رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$I' = I_0(1 + \mu \cos(\theta + \Delta\phi)) \quad (2)$$

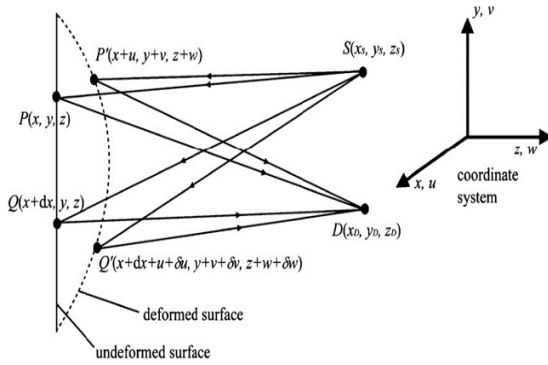
که در آن $\Delta\phi$ به تغییرات فاز که به سبب تغییر شکل سطح ایجاد می‌شود، وابسته است. چون هر دو معادله دارای زاویه فاز تصادفی می‌باشند، با نگاه کردن به تصاویر چیزی تشخیص داده نمی‌شود. با وجود این، محاسبه‌ی اختلاف شدت دو الگوی نقطه‌ای به یک الگوی حاشیه‌ای و هاله‌ای قابل مشاهده منجر می‌شود که توسط رابطه ۳ بیان می‌شود:

$$I_d = 2I_0 \left[\mu \cos\left(\theta + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \right] \quad (3)$$

رابطه (۳) تشکیل الگوی هاله‌ای که فاز $\Delta\phi$ را توصیف می‌کند، بیان می‌کند که در آن حاشیه‌های سیاه با $\Delta\phi = 2n\pi$ و $n = 1, 2, 3, \dots$ مطابقت می‌کند که در اصل یک دسته حاشیه هستند و هاله‌های روشن با نیم دیگر دسته‌های حاشیه مطابقت می‌کند.

تابنده می‌شود و به این طریق الگوی لکه‌ای روی تصاویر تشکیل می‌شود [۱۱]. در قسمت بعدی تداخل‌گر مایکلسون قرار داده شده که پرتوهای بازتاب شده از سطح قطعه را می‌تواند به حالت‌های مختلف برش دهد. برش در اینجا به معنی جابه‌جایی تصویر است. زمانی که جسم با دو مسیر یکسان تصویر شود، تصاویر بر یکدیگر منطبق می‌شوند. در اینجا برش تصویر اتفاق نمی‌افتد حتی اگر دو تصویر وجود داشته باشد. زمانی که با دو مسیر مستقل تصویر شود، دو تصویر می‌توانند به طور مستقل دست‌کاری شوند، به این معنی که دو تصویر برش خورده با فازهای متفاوت روی هم ایجاد می‌شود و توسط دوربین ضبط می‌شود. یک آینه برای برگرداندن پرتو به سطح قطعه که ثابت در محل خود قرار دارد در پشت تداخل‌گر است. آینه‌ی دیگری که زاویه‌ی آن متغیر است برای ایجاد زاویه‌ی های برش دلخواه وجود دارد. با تغییر این زاویه، فاز پرتوهای خروجی از تداخل‌گر تغییر می‌کند که با توجه به نوع قطعه و بارگذاری، باید این زاویه به طور دقیق محاسبه شود. پس از برش خوردن تصاویر، لنز همگرا و متمرکز کننده در جلوی دوربین قرار داده می‌شود تا تصویرهای ایجاد شده در تداخل‌گر روی هم قرار گیرند و به دوربین برسند. شکل ۱ چیدمان نوری برش‌نگاری دیجیتال در حالت خارج صفحه^۱ به منظور بدست آوردن مشتق‌های جابه‌جایی را نشان می‌دهد. در انتها یک دوربین CCD برای ضبط تصاویر قرار داده شده است که خروجی دوربین به رایانه برای پردازش تصویر متصل است. نکته‌ی بسیار مهم فاصله‌های بین هر یک از تجهیزات می‌باشد. یعنی باید در فاصله‌ی بهینه نسبت به یکدیگر و نسبت به نمونه قرار بگیرند تا تصاویر با بهترین کیفیت ایجاد شود. بارگذاری مناسب و بهینه در بدست آوردن تصاویر با دقت بالا و پیدا کردن عیوب، نقش اساسی دارد. این بارگذاری به صورت‌های مختلف ممکن است اعمال شود از جمله: فشاری، حرارتی، خلاء نسبی، کششی، ارتعاشی، صوتی. توسط دوربین، عکس‌هایی از سطح قطعه قبل و بعد از بارگذاری گرفته می‌شود. پس از پردازش تصاویر توسط نرم‌افزار، عکس‌ها از هم کم می‌شوند و الگوهای فازی و الگوهای هاله‌ای بدست می‌آید که از تحلیل آنها می‌توان به وجود عیب یا ناپیوستگی، پی برد.

¹ Out of plane



شکل ۲. مسیر پرتو تابشی و بازتابی از سطح، قبل و بعد از بارگذاری. [۱۲]

که در آن:

$$R_D = (x_D^2 + y_D^2 + z_D^2) \quad (۶)$$

$$R_s = (x_s^2 + y_s^2 + z_s^2)$$

با جمع روابط (۵) و (۶) خواهیم داشت:

$$A = \frac{x - x_D}{R_D} + \frac{x - x_s}{R_s} \quad (۷)$$

$$B = \frac{y - y_D}{R_D} + \frac{y - y_s}{R_s}$$

$$C = \frac{z - z_D}{R_D} + \frac{z - z_s}{R_s}$$

با جایگذاری رابطه (۷) در (۵) داریم:

$$\Delta L_p = Au + Bv + Cw \quad (۸)$$

بعد از بارگذاری، نقطه‌ی Q که مانند نقطه‌ی P پرتو لیزر به آن تابیده است، به دلیل تغییر شکل سطح قطعه به نقطه

$$Q'(x + dx + u + \delta u, y + v + \delta v, z + w + \delta w)$$

منتقل می‌شود که در آن $u + \delta u$ و $v + \delta v$ و $w + \delta w$ به ترتیب مولفه‌های x و y و z بردار جابجایی برای نقطه Q می‌باشند. تغییر مسیر نوری برای نقطه Q برابر است با [۱۲]:

$$\Delta L_Q = A(u + \delta u) + B(v + \delta v) \quad (۹)$$

$$+ C(w + \delta w)$$

مسیر نوری نسبی، از تفریق کردن دو رابطه (۸) و (۹) به دست می‌آید:

$$\Delta L_Q - \Delta L_p = A \delta u + B \delta v + C \delta w \quad (۱۰)$$

اگر میزان برش dx کوچک باشد، تفاضل جابه‌جایی با مشتق جابه‌جایی تقریباً برابر می‌شود و تفاضل فاز نوری بدست می‌آید:

سپس به بررسی ارتباط بین فاز الگوی هاله‌ای و مشتق‌های جابجایی می‌پردازیم. مرکز مختصات بر روی مرکز سطح قطعه در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل (۲) فرض می‌شود نقطه‌ی دلخواه $P(x, y, z)$ بر روی سطح قطعه قرار دارد. نقطه‌ی خروجی پرتوی لیزر $S(x_s, y_s, z_s)$ می‌باشد که بر نقطه P بر روی سطح قطعه تابیده می‌شود. تصویر بازتابی از سطح، بعد از عبور از تداخل‌گر، در نقطه $D(x_D, y_D, z_D)$ بر روی آشکارکننده قرار می‌گیرد. بعد از بارگذاری روی قطعه، نقطه P به نقطه $P'(x + u, y + v, z + w)$ منتقل می‌شود که در اینجا (u, v, w) بردار جابجایی در نقطه P می‌باشد. راستای قرارگیری دوربین نیز به سمت محور Z است.

تغییر مسیر برای پرتو از نقطه P بعد از تغییر شکل طبق رابطه (۴) می‌باشد: [۱۲]

$$\Delta L_p = (SP' + P'D) - (SP + PD) \quad (۴)$$

که در آن:

$$SP = ((x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2)^{1/2}$$

$$PD = ((x - x_D)^2 + (y - y_D)^2 + (z - z_D)^2)^{1/2}$$

$$SP' = ((x + u - x_s)^2 + (y + v - y_s)^2 + (z + w - z_s)^2)^{1/2}$$

$$P'D = ((x + u - x_D)^2 + (y + v - y_D)^2 + (z + w - z_D)^2)^{1/2}$$

با بسط چند جمله‌ای رابطه (۴) و در نظر گرفتن درجه

اول، خواهیم داشت: [۱۲]

$$\Delta L_p = \left(\frac{x - x_D}{R_D} + \frac{x - x_s}{R_s} \right) u \quad (۵)$$

$$+ \left(\frac{y - y_D}{R_D} + \frac{y - y_s}{R_s} \right) v$$

$$+ \left(\frac{z - z_D}{R_D} + \frac{z - z_s}{R_s} \right) w$$

می‌باشد. دو الگوی لکه‌ای از قطعه، یکی قبل از بارگذاری و دیگری بعد از بارگذاری توسط دوربین CCD ضبط شد. تفاوت این دو الگوی لکه‌ای باعث آشکار شدن الگوهای هاله‌ای می‌شود که قادر هستند مشتق‌های جابه‌جایی را با توجه به جهت برش تصویر، نشان دهند.

نمونه‌های تحت آزمایش شامل دو صفحه از نوع پلیمر پی‌وی‌سی و پلی اتیلن چگالی بالا با ابعاد $10 \times 120 \times 50$ میلیمتر مکعب و همچنین یک صفحه‌ی فلزی از جنس آلومینیوم ۲۰۲۴ با ابعاد $3 \times 200 \times 400$ میلیمتر مکعب، می‌باشد. جدول ۱ برخی خواص این نمونه‌ها را مشخص می‌کند.

جدول ۱. خواص نمونه‌های تحت آزمایش [۱۳]

نوع مواد	مدول یانگ	انبساط حرارتی	حرارت ویژه	رسانایی گرمایی
	Gpa	۱۰-۶ /k	J/Kg K	W/m K
پی‌وی‌سی	۴	۶۰	۲۵۰۰	۰,۲۵
پلی اتیلن	۱,۲	۱۸۰	۱۸۰۰	۰,۲۵
آلومینیوم	۷۰	۲۳	۹۱۰	۲۳۷

عیوب مصنوعی شامل ترک‌ها و سوراخ‌ها با اندازه‌ها و عمق‌های مختلف در نمونه ایجاد شد. بارگذاری حرارتی توسط تفنگ حرارتی در سطحی به قطر ۶۰ میلیمتر از جلو و پشت قطعه اعمال گردید. به منظور بهبود الگوهای هاله‌ای، تمام سطح نمونه‌ها با اسپری رنگ سفید پوشانده شد. برای آزمایش نمونه‌های پلیمری، چند صفحه با عیوب مصنوعی تهیه شد، به گونه‌ای که:

ابتدا یک سوراخ به قطر ۱۰ میلیمتر در عمق ۰,۵ میلیمتر در پشت نمونه ایجاد شد. سپس این قطعه مورد ارزیابی برش‌نگاری قرار گرفت. اگر این سوراخ از روش بارگذاری حرارتی تشخیص داده نشود، عمق سوراخ را ۰,۵ میلیمتر افزایش دادند و دوباره نمونه را بازرسی کردند. این فرآیند تا زمانی که سوراخ در عمق قابل شناسایی قرار بگیرد، ادامه پیدا می‌کند. سپس همین روش برای سوراخ با قطرهای ۸، ۴ و ۲ میلیمتر تکرار شد.

در نمونه‌های آلومینیومی، سوراخ و ترک‌های ایجاد شده مطابق شکل ۳ می‌باشند. ترک‌های ایجاد شده همگی دارای عرض یکسان برابر با ۰,۲ میلیمتر ولی طول و عمق متفاوت می‌باشند.

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (A \frac{\partial u}{\partial x} + B \frac{\partial v}{\partial x} + C \frac{\partial w}{\partial x}) dx \quad (11)$$

در معادله (۱۱) A، B و C عامل‌های حساسیت هستند و برابر با مولفه‌های بردار حساسیت K می‌باشند و λ نیز طول موج پرتو نور است. در حالت کلی اندازه‌گیری مشتق جابه‌جایی، رابطه اصلی برش‌نگاری به صورت رابطه‌ی ۱۲ می‌باشد: [۱۲]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (k_x \frac{\partial u}{\partial x} + k_y \frac{\partial v}{\partial x} + k_z \frac{\partial w}{\partial x}) dx \quad (12)$$

که در آن $K = (k_x, k_y, k_z)$ مولفه‌های بردار حساسیت می‌باشند و بستگی به جهت روشن کردن قطعه توسط لیزر و جهت مشاهده پرتوهای بازتاب شده دارد. اگر مولفه‌های k_x و k_y خیلی کوچک باشند و بتوان از آنها صرف نظر کرد، سیستم به طور کامل نسبت به مشتق جابه‌جایی خارج صفحه حساس می‌شود. در این صورت اگر جهت روشن کردن و جهت مشاهده روی یک خط راست باشد، رابطه جابه‌جایی خالص خارج صفحه به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\lambda \Delta\varphi}{4\pi dy} \quad (13) \text{ برش تصویر در راستای } y$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta\varphi}{4\pi dx} \quad (14) \text{ برش تصویر در راستای } x$$

۴- استفاده از روش برش‌نگاری در آزمون‌های

غیرمخرب

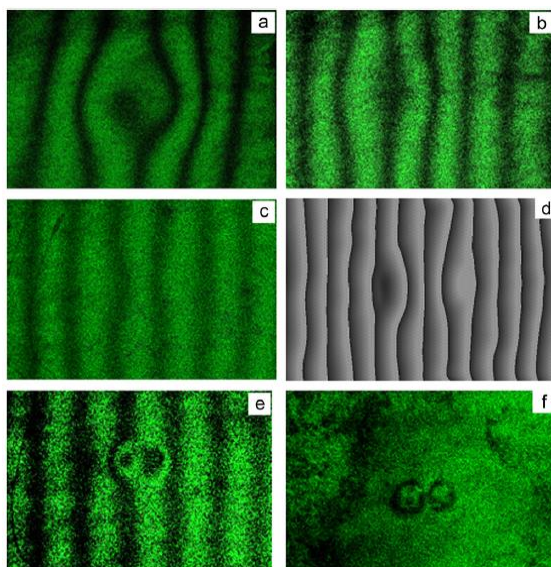
در این قسمت به بیان مهمترین فعالیت‌های صورت گرفته در رابطه با قابلیت روش برش‌نگاری در تشخیص عیوب با توجه به نوع بارگذاری و جنس نمونه انتخابی، پرداخته شده است. با توجه به ضخامت کم مواد مرکب که در ساخت قطعات مختلف استفاده می‌شود، روش برش‌نگاری در تشخیص عیوب این مواد بسیار کارآمد می‌باشد.

۴-۱- قابلیت روش برش‌نگاری در عیب‌یابی نمونه‌های آلومینیومی و پلیمری

ژانوی و همکاران در سال ۲۰۱۱ و با تاکید بر جنس‌های پلیمری و فلزی و بر اساس بارگذاری حرارتی، قابلیت روش برش‌نگاری را بررسی کردند. [۱۳]

آن‌ها از پرتو لیزر با طول موج ۵۳۲ نانومتر برای روشن کردن سطح قطعه استفاده کردند. دستگاه برش تصاویر، شامل دو منشور برشی انکساری و همچنین قطبی‌کننده

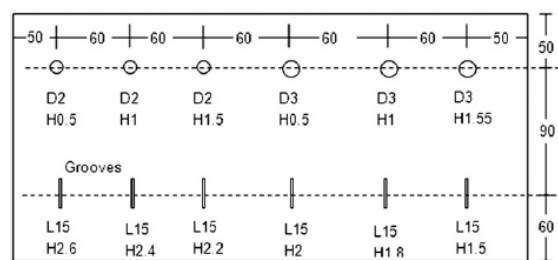
زمان تصاویر ضبط شده قبل و بعد از بارگذاری بسیار مهم است و در کیفیت الگوهای هاله‌ای و تحلیل نتایج موثر است. اگر تصاویر اولیه خیلی زود گرفته شود، ممکن است همبستگی بین تصاویر بعدی اتفاق نیفتد و منجر به الگوهای هاله‌ای ضعیف و غیر قابل شناسایی می‌شود. اگر تصاویر اولیه خیلی دیر گرفته شود، باعث کاهش امکان شناسایی عیب می‌شود. برای اینکه جواب‌های آزمایش قابل قبول باشند، هر آزمایش روی هر عیب خاص، ده مرتبه تکرار شد.



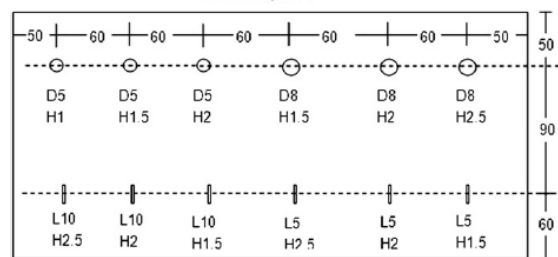
شکل ۴. الگوهای هاله‌ای برای نمونه پی وی سی با سوراخ‌های مختلف. (a) $10D, 8H$: سوراخ به قطر ۱۰ و عمق بحرانی ۸،۵؛ (b) $8D, 8H$: تکثیر حاشیه فازی برای قسمت c؛ (e) $H5D4$; (f) $H1, 5D2$ [۱۳]

یکی از مشکلات ذاتی برش‌نگاری، کیفیت پایین الگوهای هاله‌ای و در نتیجه دقت پایین تشخیص عیب‌ها می‌باشد. در این مقاله از تکنیک فاز هندسی دیجیتالی در تکثیر حاشیه‌ها که از روش‌های پردازش تصویر می‌باشد، برای الگوهای مشکوک استفاده شد. در شکل ۴ قسمت (d) برای واضح‌تر شدن الگوی هاله‌ای از تکثیر هاله‌ها و نازک کردن آنها استفاده شد که بسیار راحت‌تر می‌توان تحلیل نمونه را انجام داد. نتایج آزمایش‌ها برای دو نمونه پلیمری با جنس‌های مختلف تقریباً یکسان بوده است. همچنین، قابلیت برش‌نگاری در تشخیص عیوب زمانی که عمق عیوب افزایش یابد و یا اندازه‌ی آنها کوچک شود، به سرعت کم می‌شود. رابطه‌ی بین قطر سوراخ و عمق بحرانی که در شکل ۵ نمایش داده شده است را می‌توان به عنوان منطقه‌ی

در اینجا عمق عیب، نزدیکترین فاصله‌ی بین سطح نمونه و مرز عیب است. یعنی برای سوراخ‌های کروی عمق عیب برابر فاصله‌ی بین سطح نمونه و سطح بالایی سوراخ است و برای عیوب سطحی، این فاصله از سطح نمونه تا سطح زیرین عیب می‌باشد. روش انجام آزمایش مشابه نمونه‌های پلیمری بود. به دلیل اینکه رسانایی گرمایی آلومینیوم بسیار بیشتر از پلیمرها است، حرارت اعمال شده به سطح آلومینیوم سریع منتقل می‌شود و تغییر شکل نمونه خیلی کوتاه و گذرا می‌شود و الگوهای هاله‌ای نامشخصی بدست آمد. برای رفع این مشکل، تغییرات دمایی بالاتری جهت اعمال نیروی حرارتی نیاز است. برای تشخیص ترک‌ها، جهت‌های متفاوت صفحه برش شامل: موازی، عمود و با زاویه‌ی مایل نسبت به جهت ترک، استفاده شد. تمامی مشاهده‌ها از روی سطح جلوی نمونه و عیوب ایجاد شده در پشت نمونه انجام شد.



Aluminium plate-1

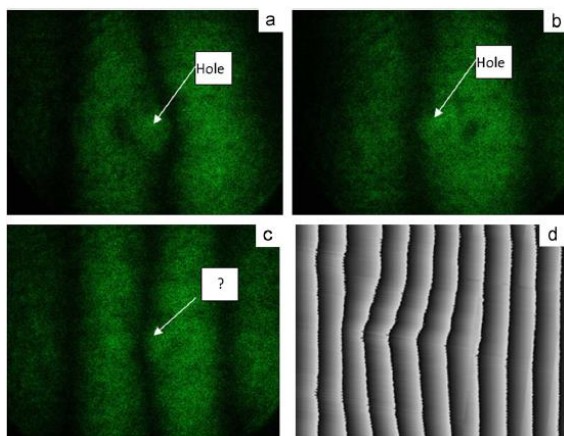


Aluminium plate-2

شکل ۳. دو صفحه‌ی آلومینیومی با سوراخ و ترک‌های ایجاد شده در آنها (D: قطر سوراخ، H: عمق عیب، L: طول ترک). [۱۳]

به منظور یکسان سازی شرایط در طول آزمایش، بارگذاری حرارتی روی نمونه‌های پلیمری در مدت ۴ ثانیه و با توان ۲۰۰۰ وات انجام شد. فاصله‌ی بین خروجی تفنگ حرارتی و سطح نمونه تقریباً ۲۰ میلی‌متر تنظیم شد. شکل ۴ تصاویر برش‌نگاری و الگوهای هاله‌ای نمونه پی وی سی با سوراخ‌های مختلف را نشان می‌دهد که در آنها تمامی عمق عیوب، عمق بحرانی هستند، یعنی بیشترین عمقی از سطح نمونه که عیب قابل شناسایی بوده است.

دلیل که رسانایی گرمایی آلومینیوم بسیار بیشتر از پلیمرها است و به سرعت نمونه تغییر شکل می‌دهد. در این حالت به پردازش تصویرهای اضافی و دوربین‌های با سرعت عکسبرداری بالاتر در حالت آنلاین نیاز می‌شود. برای غلبه بر این مشکل، از کم کردن تصاویر به صورت آنلاین استفاده نشد و به جای آن تصویرهای زیاد و خامی از نمونه در هر لحظه قبل و بعد از بارگذاری گرفته شد و سپس با پردازش تصویر الگوها ظاهر شدند. شکل ۶ برخی عیوب نمونه آلومینیومی را نشان می‌دهد که در یکی از آنها از پردازش تصویر اضافی برای افزایش هاله‌ها استفاده شده است.



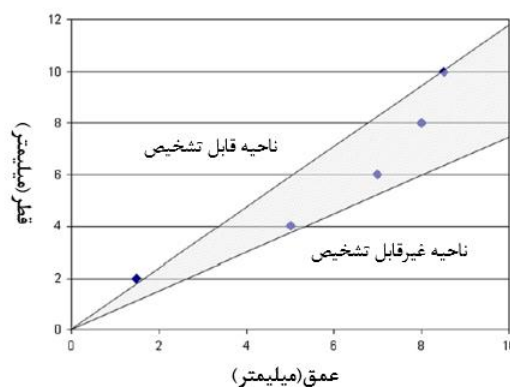
شکل ۶. الگوهای هاله‌ای برای نمونه آلومینیومی دارای سوراخ با عمق بحرانی. (a) $H_{2,5}DA$ سوراخ با قطر ۸ و عمق بحرانی ۲,۵ میلیمتر; (b) $H_{2,5}D$; (c) $H_{1,5}D$; سه بار تکثیر هاله‌ها برای الگوی (c). [۱۳]

ناحیه‌ی قابل تشخیص برای نمونه آلومینیومی در شکل ۷ نشان داده شده است. با بررسی این ناحیه، نتایج زیر قابل ارائه است:

برای قطعه آلومینیومی با ضخامت ۳ میلیمتر، حداقل قطر برای سوراخ قابل تشخیص، باید حدود ۲,۵-۳ برابر عمق متناظر آن باشد. رابطه‌ی بین طول ترک و عمق بحرانی در شکل ۸ آمده است که نشان می‌دهد قابلیت تشخیص برش‌نگاری با تغییر در جهت برش تصاویر نسبت به جهت طولی ترک‌ها، تغییر می‌کند. با توجه به الگوهای هاله‌ای در شکل ۹ و زاویه‌ی برش‌ها، این نتیجه بدست می‌آید که زمانی که جهت تصاویر برشی عمود بر جهت ترک نباشند، در زاویه‌ی صفر و ۴۵ درجه، حساسیت تشخیص عیوب به بالاترین حد خود می‌رسد. جهت برش عمود بر جهت طولی ترک باعث یکسان شدن جهت الگوها و ترک می‌شود.

قابل تشخیص، در نظر گرفت. ناحیه‌ی غیر قابل تشخیص و ناحیه بین آنها نیز مشخص شده است. تنها سوراخ‌هایی با قطر و عمق متناظر با آن قابل شناسایی است که، در ناحیه‌ی قابل تشخیص قرار داشته باشند.

با بررسی جزئی تر این شکل به این نتیجه می‌رسیم که بیشترین قابلیت تشخیص عیوب برای یک سوراخ با قطر ثابت، در فاصله‌ی بین دو سطح نمونه می‌باشد. یعنی جایی که عمق عیوب به اندازه نصف ضخامت قطعه می‌رسد. هرچه عمق عیب زیاد و یا بیش از حد کم باشد، باعث ایجاد اختلال در الگوهای هاله‌ای می‌شود و تشخیص عیب از این الگوها با دشواری همراه می‌شود. برای نمونه‌های پی‌وی‌سی و پلی اتیلن با ضخامت ۱۰ میلیمتر، حداقل قطر برای سوراخ قابل تشخیص تقریباً برابر ۰,۸-۱,۳ برابر عمق متناظر آن می‌باشد.



شکل ۵. قابلیت برش‌نگاری در تشخیص عیوب روی نمونه پی‌وی‌سی. [۱۳]

برای مثال زمانی که عمق ۲ میلیمتر است، فقط سوراخ‌های با قطر بیشتر از ۲,۲ میلیمتر ($2 \times 1,1$) قابل تشخیص بودند.

بارگذاری در این نمونه‌ها از نوع حرارتی افزایش و کاهش دما بوده است و نتایج نشان می‌دهد که هر دو نوع بارگذاری مناسب می‌باشد و برای نمونه‌های پی‌وی‌سی و پلی اتیلن، نتایج یکسانی بدست آمد.

آزمایش بر روی نمونه‌های آلومینیومی نشان داد که تصاویر ضبط شده در حین افزایش درجه حرارت، خیلی واضح تر از تصاویر در حین کاهش درجه حرارت هستند. پس بارگذاری مناسب برای این نمونه‌ها از نوع افزایش درجه حرارت می‌باشد که حساسیت به تشخیص عیوب را بالا می‌برد. در مقایسه با نمونه‌های پلیمری، افزایش درجه حرارت برای آلومینیوم خیلی سریع و کوتاه می‌باشد. به این

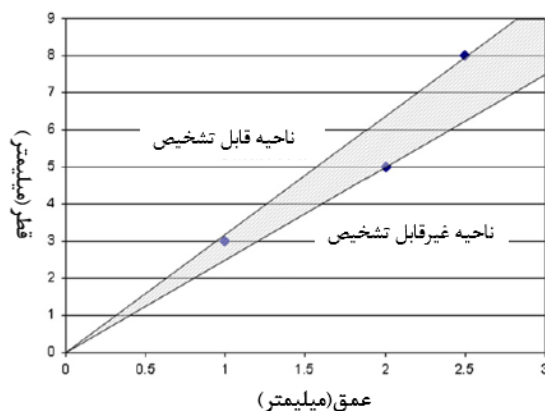
لیوبین و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده از بارگذاری حرارتی و خلاء نسبی، قابلیت روش برش‌نگاری را روی نمونه‌های با ساختار لاستیک و فلز، مورد بررسی قرار دادند. [۱۴]

با وجود مقاومت و سختی کم، لاستیک دارای ویژگی‌های مهمی از جمله چسبندگی، مقاومت به سایش، مقاومت مکانیکی و تحمل رطوبت است. با استفاده از تکنولوژی اتصال، لاستیک می‌تواند به فلز به عنوان یک ساختار کامپوزیت که به طور گسترده در صنایع مدرن استفاده می‌شود، متصل شود. به طور کلی، روش‌های اتصال به دو دسته‌ی پیوند جوشی و پیوند غیر جوشی تقسیم می‌شوند. در این مقاله با روش جوشی، نمونه‌ای از لاستیک استایرن-بوتادین که نوعی الاستومر مصنوعی است با ضخامت ۲ میلی‌متر، به صفحه‌ی فولادی کم کربن متصل شد. سطح فلز و لاستیک با کاغذ سنباده ۱۲۰ پولیش زده شد تا صفحه‌های اکسید شده، جدا شوند. سپس سطح فلز با استون تمیز شد و سطح لاستیک به محلول ۵٪، تریکلروسیانوریک اسید برای کاهش دادن زبری سطح آغشته گردید. بعد از آماده سازی سطوح، دو صفحه توسط چسب اپوکسی با ضخامت تقریباً ۰,۲ میلی‌متر، به یکدیگر متصل شدند و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شدند. پس از آن به مدت ۳ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد حرارت دیدند.

در نمونه‌ی مورد نظر مطابق شکل (۱۰) عیوب مصنوعی ایجاد شد. عیوب اتصال، با قرار دادن ۲ لایه پلی‌تترافلورواتیلن با هندسه‌های مشخص شده در لایه‌ی چسب بین فلز و لاستیک، ایجاد شد. عیب دیگری نیز در نمونه‌ها با تغییر ضخامت چسب بین لایه‌ها از ۰,۲ تا ۰,۶ میلی‌متر ایجاد شد. ابعاد صفحه‌ی نمونه ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت لاستیک و چسب و فلز به ترتیب ۲ و ۰,۲ و ۱,۵ میلی‌متر است.

در این مقاله از بارگذاری حرارتی به کمک دو نورافکن با توان ۲۰۰۰ وات در کنار سیستم برش‌نگاری و همچنین بارگذاری خلاء نسبی توسط محفظه‌ی خلاء، استفاده شد. در بارگذاری حرارتی، نمونه در فاصله‌ی حدود ۱,۲ میلی‌متر از دستگاه برش‌نگاری قرار گرفت و سطح لاستیک توسط پرتو لیزر با طول موج ۵۳۲ نانومتر شد. قبل از بارگذاری، تصویر مرجع توسط دوربین از سطح نمونه ضبط گردید. بعد از ۳ ثانیه بارگذاری، تغییر شکل خارج سطح در دستگاه

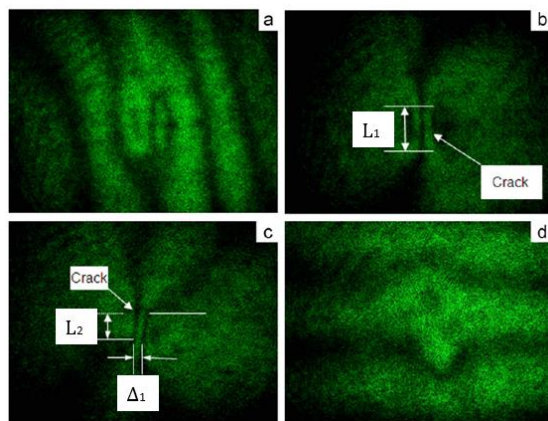
متناسب با نوع قرارگیری ترک در نمونه، باید زاویه‌ی برش مناسب انتخاب شود.



شکل ۷. قابلیت برش‌نگاری در تشخیص حفره نمونه آلومینیومی. [۱۳]



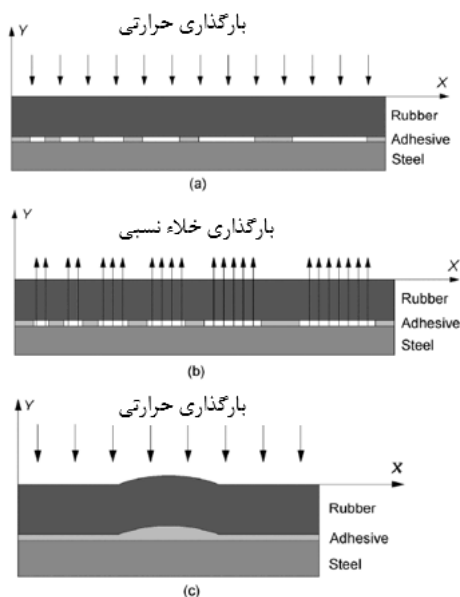
شکل ۸. قابلیت برش‌نگاری در تشخیص ترک نمونه آلومینیومی. [۱۳]



شکل ۹. الگوهای هاله‌ای برای نمونه آلومینیومی با ترک با طول ۱۵ و عمق ۱,۸ میلی‌متر؛ (a) افزایش درجه حرارت و زاویه برش عمود بر طول ترک؛ (b) کاهش درجه حرارت و زاویه برش عمود بر طول ترک؛ (c) کاهش درجه حرارت با زاویه برش ۴۵ درجه؛ (d) افزایش درجه حرارت با زاویه برش موازی. [۱۳]

۴-۲- ارزیابی قابلیت روش برش‌نگاری روی ساختارهای لاستیک و فلز

در حالت خلاء، از آنجا که فشار هوا داخل محفظه، زیر فشار اتمسفر استاندارد است، سطح داخل عیب‌ها تحت

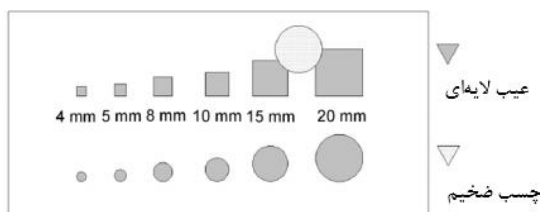


شکل ۱۱. شماتیک مدل اجزا محدود نمونه تحت بارگذاری‌های حرارتی و خلاء نسبی. (a) بارگذاری حرارتی روی عیب اتصال؛ (b) بارگذاری خلاء نسبی؛ (c) بارگذاری حرارتی روی قسمت دارای چسب ضخیم بین لایه‌ها. [۱۴]

توزیع فشار یکنواخت قرار گرفتند. پس فشار یکنواخت ۶ کیلوپاسکال به سطح عیب‌ها وارد شد. از آنجا که مدول الاستیک فولاد بسیار بیشتر از لاستیک است، تغییر شکل فولاد ناشی از فشار داخلی نادیده گرفته شد. در شرایط ضخامت غیر یکنواخت چسب، لایه‌ی چسب بین دو صفحه از ۰٫۲ تا ۰٫۶ میلی‌متر تغییر ضخامت می‌دهد که طبق شکل (c) ۱۱ در مدل اجزا محدود، بارگذاری خلاء نمی‌تواند هیچ فشار داخلی را در لایه‌ی چسب ایجاد کند در حالی که شار حرارتی ۷ وات بر متر مربع توانست باعث تغییر شکل خارجی نمونه شود.

تصاویر فازهای تداخلی برای بارگذاری حرارتی و خلاء نسبی روی نمونه، در شکل (۱۲) نشان داده شده است. این تصاویر فازی، مشتق جابه‌جایی خارج صفحه را نشان می‌دهند. با توجه به الگوهای فازی، همه‌ی ۱۲ عیب مربعی و دایره‌ای ایجاد شده به کمک هر دو بارگذاری حرارتی و خلاء نسبی تشخیص داده شد، اما فقط بارگذاری حرارتی، تغییر ضخامت چسب را نشان داد. با مقایسه‌ی شکل (a) ۱۲ و شکل (۱۰) می‌توان لایه‌ی چسب ضخیم بین دو صفحه را در الگوهای هاله‌ای مشاهده کرد. اندازه‌ی عیب‌های

نشان داده شد. دستگاه برش‌نگاری قادر است سطحی به اندازه‌ی ۱۶۵×۲۲۰ میلی‌متر را در یک مرحله بازرسی کند. مقدار برش تداخل‌گر مایکلسون به اندازه‌ی ۶۰ میکسل در جهت افقی تنظیم شد. در بارگذاری خلاء نسبی، نمونه در محفظه‌ی خلاء گذاشته شد و سطح لاستیک، توسط پرتو لیزر از میان پنجره شیشه‌ای شفاف، روشن شد. وقتی که پمپ خلاء، اختلاف فشاری به اندازه‌ی ۶ کیلوپاسکال نسبت به فشار محیط ایجاد کرد، تصویر مرجع و اولیه گرفته شد. سپس با کنترل کردن نرخ نشت فشار هوا تصویرهای بعدی گرفته و ذخیره شدند.



شکل ۱۰. نمونه مورد آزمایش و عیوب مصنوعی ایجاد شده در آن. [۱۴]

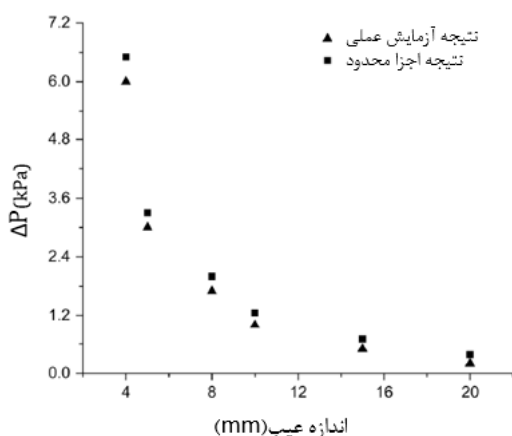
علاوه بر آزمایش‌های عملی، مدل اجزای محدود برای تخمین زدن تغییر شکل نمونه تحت بارگذاری حرارتی و خلاء نسبی، به کار گرفته شد. در بررسی‌های عددی، لاستیک، چسب و فولاد، همگن فرض گردید. دو نوع عیب شامل یکی عدم اتصال مناسب دو صفحه و دیگری ضخامت غیریکنواخت چسب در نظر گرفته شد. تمامی جزئیات موجود در نمونه طبق شکل (۱۰) مدل شد و مولفه‌های جابه‌جایی فولاد در کف نمونه به عنوان شرایط مرزی انتخاب گردید. شکل (۱۱) مدل اجزا محدود برای نمونه را تحت بارگذاری‌های حرارتی و خلاء نسبی و تغییر شکل سطح را نشان می‌دهد. در مدل بارگذاری حرارتی، شار حرارتی ۴ وات بر متر مربع بر سطح اعمال کردند سپس از نرم‌افزار آباکوس، مدول جابه‌جایی-حرارت برای تجزیه و تحلیل جابه‌جایی سطحی ناشی از انتقال حرارت مورد استفاده قرار گرفت.

فشار خلاء برای بدست آوردن تصاویر با کیفیت بالا بسیار مهم و لازم است. این نتیجه‌گیری بر اساس شکل (۱۴) که الگوهای حاشیه‌ای را در فشارهای مختلف نشان می‌دهد، بدست آمد.

ویژگی بارگذاری حرارتی این است که به راحتی اعمال می‌شود و یک حالت بارگذاری مهم در ارزیابی کیفیت ساختارهای متصل شده می‌باشد. در مقایسه با میدان جابه‌جایی ناشی از بارگذاری خلاء، توزیع جابه‌جایی در هر دو حالت یکسان است. تحت یک تابش گرمایی خاص، جابه‌جایی سطح خارجی عیب‌های بزرگ‌تر به میزان قابل توجهی بیشتر از عیب‌های کوچک می‌باشد.

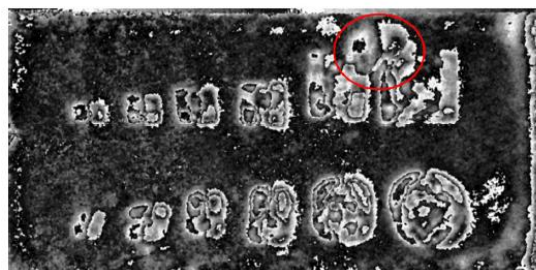
جدول ۲. اندازه‌گیری ابعاد عیب‌ها [۱۴]

ابعاد عیب اندازه‌گیری شده توسط بارگذاری خلاء	ابعاد عیب اندازه‌گیری شده توسط بارگذاری حرارتی	ابعاد اصلی عیب‌های پیش‌ساخته	شماره عیب
mm	mm	mm	
۲۰٫۸۹	۱۹٫۲۵	۲۰	۱
۱۴٫۷۱	۱۴٫۵۲	۱۵	۲
۹٫۵۴	۱۰٫۳۶	۱۰	۳
۷٫۸۷	۷٫۰۵	۸	۴
۵٫۳۷	۵٫۸۶	۵	۵
۴٫۸۷	۴٫۵۰	۴	۶

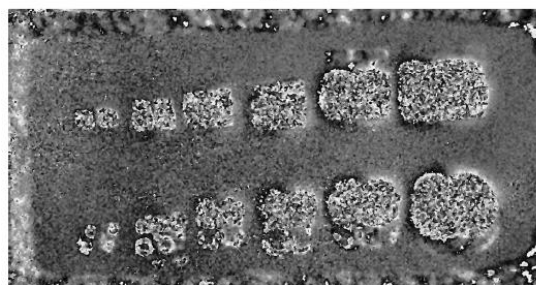


شکل ۱۳. مقایسه‌ی مقادیر فشار و نتایج تشخیص عیب‌ها توسط مدل‌سازی اجزا محدود و آزمایش عملی. [۱۴]

اندازه‌گیری شده بعد از تحلیل الگوهای هاله‌ای در جدول ۲ نشان داده شده است. اگرچه خطایی بین اندازه‌ی ابعاد اصلی عیب‌ها و مقدار اندازه‌گیری شده وجود دارد، اما این مقدار کمتر از ۱ میلی‌متر است که دقت بالای دستگاه را نشان می‌دهد. در جدول (۲) ابعاد اصلی عیب‌ها و ابعاد اندازه‌گیری شده توسط بارگذاری حرارتی و خلاء قابل مقایسه است.



(a)



(b)

شکل ۱۲. تغییر الگوهای حاشیه‌ای در نمونه. (a) بارگذاری حرارتی؛ (b) بارگذاری خلاء. [۱۴]

همانطور که مشخص است، دو بارگذاری حرارتی و خلاء نسبی با اینکه تفاوت‌هایی در آشکار ساختن عیب و نوع تغییر شکل روی صفحه‌ی نمونه دارند، در تشخیص عیوب اتصالی موفق بودند. هرچه اندازه‌ی عیب بزرگ‌تر باشد، راحت‌تر و با اعمال نیروی کمتری آشکار می‌شود و برعکس، عیب‌های با ابعاد کوچک‌تر نیازمند اختلاف فشار درون محفظه و تغییرات گرمایی زیادتری می‌باشند.

به منظور بررسی رابطه بین اندازه عیب قابل تشخیص و اختلاف فشار مورد نیاز در محفظه‌ی خلاء، یک بررسی چند مرحله‌ای با حالت‌های مختلف خلا انجام شد. همچنین شبیه‌سازی عددی نیز بر اساس شکل (b) ۱۱ انجام گردید. تغییر اندازه عیب و شرایط بارگذاری که مشخص می‌کند کدام عیب‌ها به ترتیب آشکار شده‌اند، در شکل (۱۳) نشان داده شده است. زمانی که فشار خلاء به ۶ کیلوپاسکال رسید، کوچکترین عیب با اندازه‌ی ۴ میلی‌متر مشخص شد در حالی که الگوهای حاشیه‌ای برای بقیه‌ی عیب‌ها بسیار متراکم و غیر قابل تحلیل شد. از این نقطه‌نظر، تنظیم دقیق

مواد مرکب چوب-پلاستیک، قابلیت برش‌نگاری را در تشخیص عیب‌ها روی این مواد، مورد بررسی قرار دادند. [۱۵]

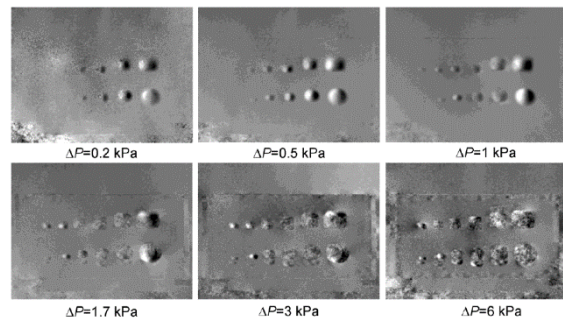
مواد مرکب چوب-پلاستیک یکی از پرکاربردترین نمونه‌های مواد مرکب می‌باشند که به طور گسترده در زمینه‌های مختلف در حال رشد هستند. این نمونه‌ها کاربرد بسیاری دارند که عمدتاً در بخش‌های ساختمانی هدف قرار می‌گیرند. کیفیت چسبندگی بین الیاف و ماتریس مهمترین عامل برای دستیابی به خواص مطلوب است. کیفیت ضعیف چسبندگی ممکن است منجر به وجود نقص در فصل مشترک چوب و پلیمرها شود که منبع اصلی ضعف نمونه است. بنابراین استفاده از روش‌های جدید و عملی برای بازرسی مواد مرکب به منظور کشف عیوب در ساختار آنها بسیار مهم به نظر می‌رسد.

روش‌های اصلی برای ساخت مواد مرکب چوب-پلاستیک، اکستروژن و قالب‌گیری تزریقی می‌باشد. اکستروژن که در آن اجزای چوب و پلیمر از طریق یک قیف با مواد افزودنی تغذیه می‌شوند، سپس ذوب می‌شوند و با استفاده از قالب شکل داده می‌شوند، از رایج‌ترین روش تولید است. همچنین از روش قالب‌گیری تزریقی برای شکل دادن چوب و قطعات پلاستیک (گرانول) مخلوط شده با هم جهت ساخت قسمت‌هایی استفاده می‌شود که نمی‌توان آنها را با اکستروژن تولید کرد.

مطابق شکل (۱۶) سه نمونه به روش قالب‌گیری تزریقی شامل ۱۰، ۲۵، ۴۵ درصد وزنی ذرات چوب و یک نمونه با کیفیت بالای چوب که با روش قالب‌گیری تزریقی امکان ساخت آن نبود، توسط روش اکستروژن تولید شد. سپس در پشت آن حفره ایجاد شد تا قابلیت روش برش‌نگاری برای تشخیص این حفره مشخص شود.

در این آزمایش، از پرتو لیزر ۱۰ میلی وات با طول موج ۶۳۲٫۸ نانومتر، دو آینه با پوشش آلومینیومی به قطر ۱ اینچ و ضخامت ۹ میلی‌متر، برای تابش دوجانبه، دو آینه با پوشش آلومینیوم به قطر ۲ اینچ و ضخامت ۴٫۵ میلی‌متر، دو لنز مسطح به قطر ۰٫۵ میلی‌متر برای پراکنده کردن نور لیزر استفاده شد. به عنوان ماده‌ی پلیمری در این نمونه از پلی اتیلن چگالی بالا و برای عنصر چوب از چوب بلوط سفید با اندازه‌ی دانه ۳۰-۴۰ مش استفاده شد.

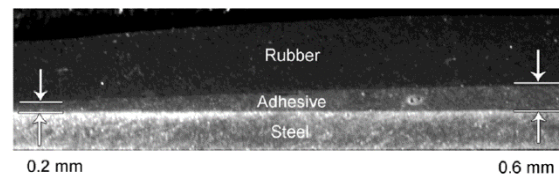
برای ضبط تصاویر برش‌نگاری با کیفیت بالاتر، ابتدا سطح نمونه با اسپری رنگ سفید پوشیده شد سپس نمونه‌ها بین



شکل ۱۴. الگوهای حاشیه‌ای عیب‌ها در فشارهای خلاء مختلف. [۱۴]

به این معنی که، یک بارگذاری حرارتی قوی‌تر برای تشخیص عیب با ابعاد کوچک‌تر مورد نیاز است. در طی آزمایش این نتیجه بدست آمد که، الگوهای هاله‌ای که توسط بارگذاری حرارتی به وجود آمده‌اند، با زمان تغییر می‌کنند. انتقال حرارت در مواد نمونه و انتقال حرارت بین هوای اطراف و نمونه تا زمان پایداری دمایی، باعث این تغییرات می‌شود. پس کیفیت الگوهای هاله‌ای در بارگذاری حرارتی به اندازه‌ی الگوهای حاصل از بارگذاری خلاء، قابل اعتماد نیستند.

علاوه بر استفاده‌ی آسان از بارگذاری حرارتی، این روش برای تشخیص حفره‌ها و ترک‌هایی که راه به در هستند و روی سطح ایجاد مسیره‌های باز می‌کنند، مناسب است. در این شرایط بارگذاری خلاء نمی‌تواند باعث جابه‌جایی خارج صفحه شود مگر اینکه اختلاف فشار هوای بین سطح نمونه و داخل آن به سرعت صفر شود. علاوه بر این، تنها بارگذاری حرارتی توانست ضخامت غیریکنواخت چسب بین فولاد و لاستیک را تشخیص دهد، شکل (۱۵) نشان دهنده‌ی تغییر ضخامت چسب از ۰٫۲ تا ۰٫۶ میلی‌متر در بین دو لایه می‌باشد.

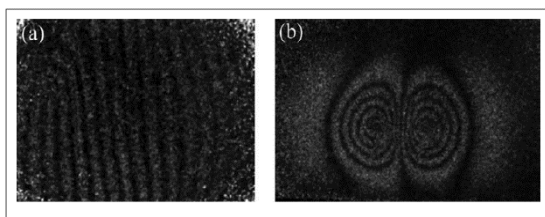


شکل ۱۵. مقطع عرضی ساختار لاستیک و فلز با ضخامت چسب. [۱۴]

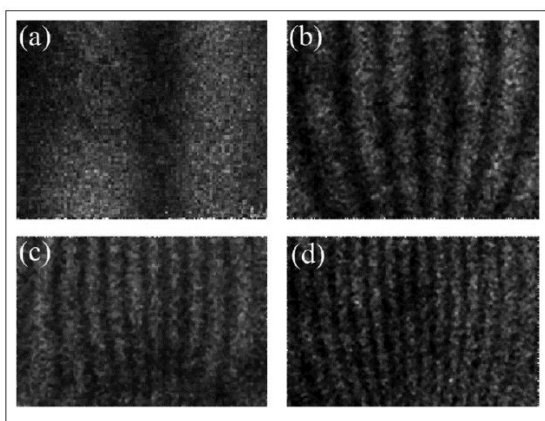
۳-۴- به کارگیری برش‌نگاری در تشخیص عیوب در مواد مرکب چوب-پلاستیک

بَرَموز و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از بارگذاری حرارتی و ایجاد عیب‌های مصنوعی در نمونه‌هایی از جنس

باربرداری نشان می‌دهد. این الگوها عدم وجود عیب در نمونه را نشان می‌دهند.



شکل ۱۷. مقایسه الگوهای هاله‌ای برش‌نگاری نمونه‌ی ۶۰ درصد وزنی چوب. (a) نمونه سالم؛ (b) نمونه دارای حفره. [۱۵]



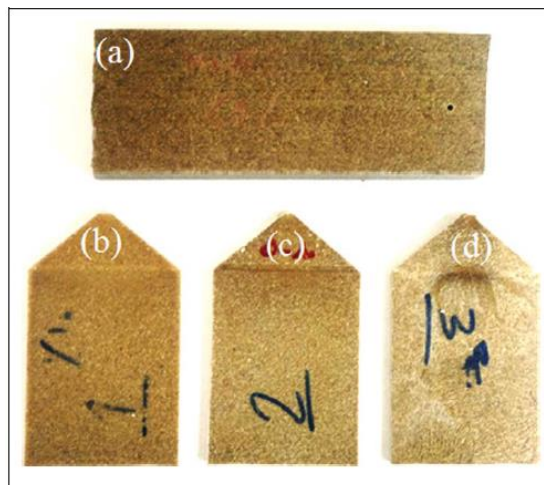
شکل ۱۸. (a) تا (d) الگوهای هاله‌ای موازی حاصل از بازرسی نمونه‌ی ۱۰ درصد وزنی چوب تولید شده به روش قالب‌گیری تزریقی به ترتیب ۱ تا ۴ ثانیه بعد از باربرداری. [۱۵]

خطوط عمودی سیاه در زمان‌های مختلف باربرداری ثابت باقی ماند و بدون هیچگونه انحراف، فقط به هم نزدیک شدند. حجم پایین چوب موجود در این نمونه می‌تواند نشانه‌ی سالم بودن قطعه طبق دلایل روبرو باشد: (۱) تسهیل جریان مواد حاصل از لزجت پایین مواد مرکب در حین تولید و (۲) پراکندگی خوب چوب در ماتریس پلیمری.

شکل (۱۹) نتایج حاصل از ارزیابی برش‌نگاری روی نمونه با ۲۵ درصد حجمی چوب را نشان می‌دهد که این تصاویر ۲، ۴ و ۶ ثانیه بعد از باربرداری ضبط شدند. الگوهای هاله‌ای نشان می‌دهد که تعداد خطوط تیره‌ی عمودی با افزایش زمان، اضافه می‌شود. با این حال، انحراف کوچک خطوط تیره‌ی عمودی با طول تقریبی ۲ میلی‌متر مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از تراکم ذرات چوبی باشد.

با مطالعه‌ی جزئی‌تر نتایج، این نتیجه بدست می‌آید که حجم بالای مواد پرکننده در نمونه‌های مواد مرکب باعث کاهش کیفیت انتشار ذرات در آن می‌شود. شکل‌های (۲۰) و (۲۱) الگوهای هاله‌ای حاصل از بررسی برش‌نگاری روی

یک یا دو فک دستگاه کشش ثابت شدند. در قدم بعدی، بارگذاری حرارتی توسط تابش لامپ فلورسنت که در جلوی نمونه قرار داده شد، اعمال گردید تا منجر به ایجاد کرنش‌های کوچک روی سطح نمونه شود. در این آزمایش، شرایط محدود کننده در دوطرف نمونه‌ها ثابت می‌باشد اما برای نمونه ۴۰ درصد وزنی چوب تولید شده توسط قالب‌گیری تزریقی، شرایط ثابت یکطرفه مورد بررسی گرفت.



شکل ۱۶. نمونه‌های ساخته شده. (a) اکستروژن شامل ۶۰ درصد وزنی ذرات چوبی؛ (b) تا (d) قالب‌گیری تزریقی شامل به ترتیب ۱۰، ۲۵، ۴۵ درصد وزنی ذرات چوبی. [۱۵]

در ابتدا نمونه‌ی تولید شده توسط روش اکستروژن با ۶۰ درصد وزنی چوب برای تعیین قابلیت تشخیص عیب برش‌نگاری مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل (۱۷) مشخص است، نمونه‌ی (a) بدون عیب می‌باشد و الگوهای هاله‌ای موازی تشکیل شده است. در نمونه‌ی (b) سوراخی به قطر ۲ میلی‌متر در یک طرف آن ایجاد شده است. الگوهای هاله‌ای این نمونه، وجود عیب را مشخص می‌کند. با توجه به اینکه در قبل آزمایش‌هایی بر روی مواد پلیمری انجام شده بود و روش برش‌نگاری کاملاً در تشخیص عیب‌ها موفق عمل کرده بود، به این نتیجه می‌رسیم که الیاف چوب هیچگونه محدودیتی برای استفاده از روش برش‌نگاری جهت بازرسی مواد مرکب ایجاد نمی‌کند.

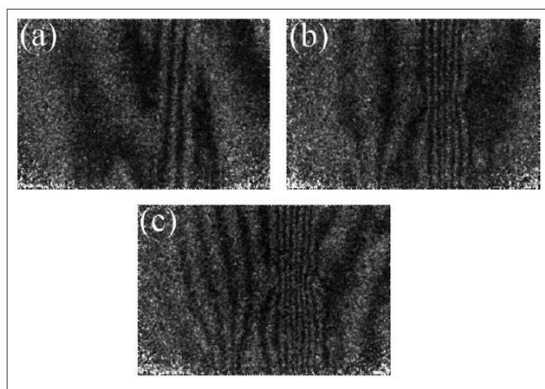
در مرحله‌ی بعدی، برش‌نگاری برای تشخیص عیب‌های احتمالی روی نمونه‌های تولید شده از طریق قالب‌گیری تزریقی، مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱۸) الگوهای هاله‌ای نمونه‌ی با ۱۰ درصد وزنی چوب را بعد از ۱ تا ۴ ثانیه

زیر سطح نمونه ماده مرکب را نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی دقت نتایج بدست آمده، آزمایش دیگری که نمونه تنها از یک طرف محدود است با همان شرایط بارگذاری قبلی، انجام شد که در شکل (۲۱) الگوهای هاله‌ای آن مشخص است.

نتایج کاملاً مشخص است و وجود عیب در لایه‌های زیر سطح نمونه ماده مرکب را نشان می‌دهد. خطوط تیره‌ی درهم شکسته، فروپاشی ساختار ماده مرکب در زیر سطح را نشان می‌دهد که منجر به انحراف نور منعکس شده از سطح نمونه می‌شود. طول قسمت انحرافی حدود ۷ میلی‌متر به بالا است. دلایل این نقص‌ها می‌تواند ناشی از موارد زیر باشد:

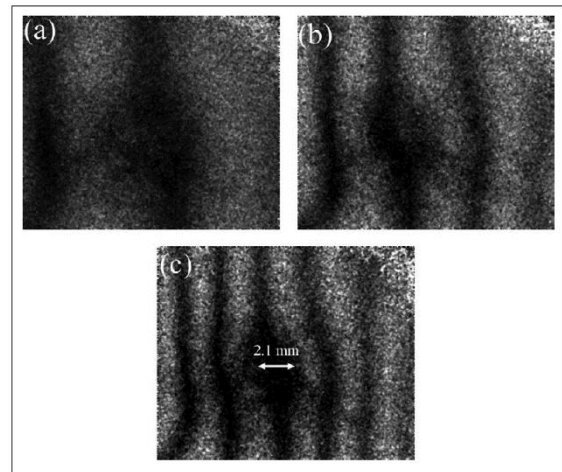
(۱) ماده مرکب با حجم بالای مواد پرکننده باعث بالا رفتن لزجت می‌شود که تولید و قالب‌گیری آن را دشوارتر می‌کند
(۲) مقدار بیشتری از ذرات چوب، تراکم اجزای چوب را در ماتریس افزایش می‌دهد که باعث ایجاد ترک و از هم گسیختگی در ساختار مواد مرکب می‌شود.

(۳) چسبندگی ضعیف اجزای چوب به یکدیگر ممکن است باعث اتصال ضعیف بین چوب و ماتریس پلیمری شود. پس روش برش‌نگاری در این نوع مواد مرکب نیز نتیجه‌های بسیار قابل قبولی از جمله اشکال در ساختار تولیدی مواد و وجود حفره در آن را در اختیار گذاشت که می‌توان با بهره‌گیری از آن به بهترین بازرسی از سطح نمونه دست یافت.



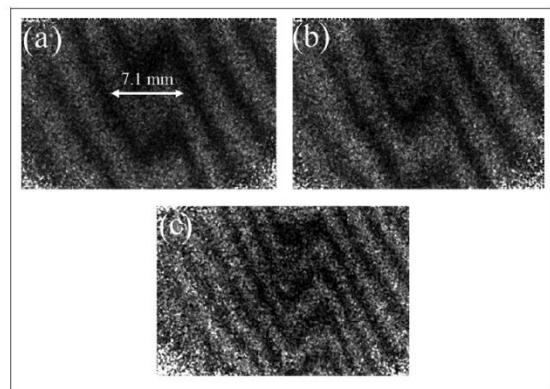
شکل ۲۱. (a) تا (c) الگوهای هاله‌ای حاصل از بازرسی نمونه با ۴۰ درصد حجمی چوب، به ترتیب ۱، ۲ و ۳ ثانیه بعد از باربرداری، یک طرف نمونه محدود شده است. [۱۵]

نمونه‌ی با ۴۰ درصد حجمی چوب، ۱ تا ۳ ثانیه بعد از باربرداری را نشان می‌دهد با این تفاوت که در شکل (۲۱) نمونه از دو طرف ولی در شکل (۲۱) نمونه فقط از یک طرف توسط فک دستگاه کشش محدود شد. در شکل (۲۰) یک الگوی ناهمگن با شکل‌گیری خطوط تیره مشاهده می‌شود.



شکل ۲۰. (a) تا (c) الگوهای هاله‌ای حاصل از بازرسی نمونه‌ی ۲۵ درصد حجمی چوب تولید شده به روش قالب‌گیری تزریقی به ترتیب ۲، ۴ و ۶ ثانیه بعد از باربرداری. [۱۵]

علاوه‌براین فاصله‌ی بین خطوط برابر نیستند و فقط تعداد کمی از آنها از الگوی موازی مستقیم، منحرف شدند که عیب شدیدی را در نمونه نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی دقت نتایج بدست آمده، آزمایش دیگری که نمونه تنها از یک طرف محدود است با همان شرایط بارگذاری قبلی، انجام شد که در شکل (۲۱) الگوهای هاله‌ای آن مشخص است. نتایج کاملاً مشخص است و وجود عیب در لایه‌های



شکل ۲۲. (a) تا (c) الگوهای هاله‌ای حاصل از بازرسی نمونه با ۴۰ درصد حجمی چوب، به ترتیب ۱، ۲ و ۳ ثانیه بعد از باربرداری، دو طرف نمونه محدود شده است. [۱۵]

[4] Hung, Y.Y., (1999). Applications of digital shearography for testing of composite structures, *Composites Part B*, 30, pp.765-773.

[5] Gryzgoridis, J., (2012). Laser based nondestructive inspection techniques, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 31, pp. 295-302.

[6] Newman, J.W., (2008). Aerospace NDT with advanced laser shearography, 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, Oct 25-28

[7] Jia, S., Hong, E., Katz, R., (2012). Nondestructive Testing of Ultrasonic Welding Joints Using Shearography Technique, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 134, pp. 034502.

[8] Sujatha N., Murukeshan V. M., Rajendran S., Ong L. S., Seah L. K., (2005), Nondestructive inspection of inner surfaces of technical cavities using digital speckle shearography, *Nondestructive testing and evaluation*, 20, pp.25-34.

[9] Akbari, D., Soltani, N., (2013), Investigation of Loading Parameters in Detection of Internal Cracks of Composite Material with Digital Shearography, *World Applied Sciences Journal*, 21, pp. 526-535.

[10] Zhang, L., Liu, H., Guo, S., Chen, Y. F., (2018), Acoustic shearography for crack detection in metallic plates, *Smart Materials and Structures*, 27,085018 (10pp)

[۱۱] اکبری، د.، سلطانی، ن.، رشادی، ف.، (۱۳۹۲) استفاده از روش برش‌نگاری دیجیتال در انجام آزمون های غیرمخرب به کمک بارگذاری حرارتی، *مجله علمی پژوهشی مکانیک مدرس*، جلد. ۱۳، شماره. ۴، ص. ۳۶-۴۵

[12] Francis, D., Tatam, R.P., Groves, R.M., (2010). Shearography technology and applications: a review, *Measurement science and technology*, 21, pp. 1-29.

[13] Liu, Z.W., Gao, J.X., Xie, H.M., Wallace, P., (2011). NDT capability of digital shearography for different materials, *Optics and Lasers in Engineering*, 49, pp. 1462-1469.

[14] Liu, B., Guo, X.M., Qi, G.J., Zhang, D.S., (2015). Quality evaluation of rubber-to-metal bonded structures based on shearography, *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 58, pp. 1-8.

[15] Barmouz, M., Behraves, A.H., Reshadi, F., Soltani, N., (2014). Assessment of defect detection in wood-plastic composites via shearography method *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, pp. 1-9.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش برش‌نگاری دیجیتال که زیرمجموعه‌ای از روش‌های نوین در بازرسی‌های غیرمخرب است بررسی شد و نحوه‌ی کار و تجهیزات به کاررفته در آن شرح داده شد. با توجه به این که این روش غیرتماسی است و مشتق جابه‌جایی سطح را محاسبه می‌کند، با بررسی چند پژوهش انجام شده به قابلیت بالای برش‌نگاری در تشخیص عیوب در قطعات به‌خصوص مواد مرکب، پرداخته شد. این روش هم در نمونه‌های فلزی و هم نمونه‌های پلیمری قابلیت بالایی را نشان داده است و می‌توان نمونه‌های مواد مرکب با ضخامت کم را نیز به راحتی با بارگذاری مناسب روی آن‌ها، بازرسی کرد.

علاوه براین، چون ترک یکی از مهمترین عیب‌های ایجاد شده در نمونه‌ها است و شناسایی ترک‌ها توسط روش‌های بازرسی دیگر، بسیار دشوار است، برش‌نگاری می‌تواند به درستی آن‌ها را تشخیص دهد. از این رو پیشنهاد می‌شود که از این روش به طور گسترده در شناسایی ترک‌ها در قطعات استفاده شود.

۶- منابع

[1] Steinchen, W., Kupfer, G., Yang, L., Mackel, P., (1998). Nondestructive testing of aerospace composite materials using digital shearography, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 212, pp.1-21.

[2] Akbari D, (2012). "Development and Application of Non Destructive Testing of Digital Shearography in Evaluation of Defects in Composite Materials". *PhD Thesis*, University of Tehran, Iran. (in Persian)

[3] Hung, Y.Y., Ho, H.P., (2005). Shearography: An optical measurement technique and applications, *Materials Science and Engineering*, 49, pp. 61-87.

Investigation of Digital Shearography for Defect Detection in Different Materials

Farzad Banakar^{1*}, Davood Akbari²

¹Msc Student, Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Iran, Tehran

²Assistant Professor, Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Iran, Tehran

* f_banakar@yahoo.com

Abstract:

The shearography method is one of non-contact and full-field method for Nondestructive testing of parts and sets. In this method the displacement gradient is directly measured. After processing the image, the surface fringe patterns are earned. It is used mainly in detecting surface and sub-surface defects of parts. Other applications include strain measurement, characterization of material properties, evaluation of residual stresses, leakage detection, structural vibration studies and three - dimensional measurements. Due to the measurement of displacement derivatives and not sensitive to the vibrations of the environment, in addition to experimental environments, it has a wide application in industrial environments, which makes this method discriminate with other optical methods. This method is used mostly in composite and metal components for defect detection. In this paper, we study techniques, equipment, method of operation, image processing, type of loading according to the materials and type of defect with emphasis on some practical researches in this regard.

Keywords: Shearography, Nondestructive test, NDT, Strain measurement