

تعیین عیوب زیر سطحی روی قطعات فلزی در آزمون‌های غیرمخرب با روش برش‌نگاری لیزری به کمک بارگذاری حرارتی

علی چهرقانی^{۱*}، عاطفه فتوت اسکندری^۱، مهدی حلاجان^۱، محمد جواد ترکمنی^۱، سید حسن نبوی^۱

^۱مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران

* a_chehrghani@yahoo.com

چکیده

امروزه از برش‌نگاری^۱ لیزری به عنوان یکی از روش‌های موثر اپتیکی با قابلیت بالا در شناسایی عیوب زیر سطحی برای مقاصد آزمون‌های غیرمخرب استفاده می‌شود. در این مقاله، روش تجربی تعیین عیوب زیر سطحی روی قطعات فلزی با روش برش‌نگاری لیزری و به کمک بارگذاری حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، در مرحله اول نمونه‌هایی از جنس آلومینیوم و به ضخامت ۳mm و ۵mm در چیدمان برش‌نگاری لیزری، تحت تابش لیزر دیودی قرار گرفته و ارزیابی شده است. عیوب زیر سطحی به صورت حفره‌هایی با قطر و عمق مختلف در پشت نمونه‌ی تحت ارزیابی ایجاد شده‌اند. پس از برپایی چیدمان مناسب، تاثیر جهت و میزان برش اعمال شده و همچنین مقدار بارگذاری حرارتی بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد، در تعیین عیوب زیر سطحی نسبت قطر به عمق عیوب از اهمیت بالایی برخوردار است. در نمونه‌های ارزیابی شده، کمینه قطر عیوب قابل شناسایی در حدود ۲/۵ برابر عمق می‌باشد. عیوب زیرسطحی معمولاً به صورت یک شکل نسبتاً متقارن در تصاویر فاز مشاهده می‌شود.

در برش‌نگاری آنچه دوربین به ما نشان می‌دهد شدت است و از آنجایی که تنش، کرنش و اطلاعات مورد نیاز جسم با تعیین فاز بدست می‌آید هدف نهایی بدست آوردن فاز از روی شدت خواهد بود. در ادامه تکمیل پروژه‌ی آزمون غیرمخرب به روش برش‌نگاری لیزری، به منظور بهبود کیفیت تصاویر و همچنین تعیین فاز و در نتیجه بدست آوردن سائز خرابی در نمونه مورد بررسی از فاز شیف‌تینگ با روش پنج مرحله ای $\pi/2$ استفاده شد. سپس تصاویر بدست آمده فیلتر و در نهایت فرآیند unwrapping روی آن‌ها اعمال گردید. برش‌نگاری روی نمونه ای از جنس پلکسی با ضخامت ۶ mm دارای عیوب دایروی و عیوبی به شکل ترک با ابعاد مختلف در پشت آن اعمال شد.

واژگان کلیدی: روش‌های اپتیکی، برش‌نگاری لیزری، عیوب زیر سطحی، بارگذاری حرارتی

۱- مقدمه

انواع عیوب با اندازه‌های مختلف ممکن است در یک قطعه ایجاد شود که ماهیت و اندازه آن‌ها، بر کارکرد آتی قطعه تأثیر گذار است. عیوب دیگری مانند ترک‌های ناشی از خستگی و خوردگی در حین کارکرد قطعه نیز ممکن است بوجود آید. تشخیص و ارزیابی اندازه، شکل و موقعیت این عیوب در کنترل عملکرد صحیح قطعات اهمیت بسیار زیادی دارد. امروزه برای بررسی کیفی تولیدات و همچنین به عنوان بخشی از برنامه‌های بازرسی در تعمیرات عادی قطعات در حین کار از آزمون‌های غیرمخرب استفاده می‌شود. آزمون‌های غیرمخرب به انواع روش‌هایی گفته می‌شود که با بهره‌گیری از آن‌ها می‌توان علاوه بر تشخیص بعضی از خواص فیزیکی و شیمیایی،

ناپوستگی‌ها، تغییرات ساختاری درون قطعات و ادوات را بدون نمونه برداری و تخریب، شناسایی و ارزیابی نمود [۱-۴]. روش‌های گوناگونی برای انجام آزمون‌های غیرمخرب وجود دارد. در بین روش‌های مختلف، آزمون‌های غیرمخرب لیزری به دلیل انجام بازرسی‌ها، اندازه‌گیری‌ها و کنترل فرآیندها به صورت غیرتماسی و همچنین حصول نتایج با سرعت و دقت بالا و هزینه پایین جایگاه ویژه‌ای کسب نموده‌اند [۵-۷]. با کمک تکنیک برش‌نگاری لیزری می‌توان تصاویری سه بعدی از اجسام تحت آزمون ایجاد کرد که در آنها محل وجود عیوب ساختاری قابل رویت است [۸، ۹]. برای نمونه، نلسون و همکارانش در تحقیقی روش برش‌نگاری لیزری را برای تعیین تنش‌های پسماند در قطعات مختلف بکار برده‌اند [۱۰]. علاوه بر تعیین تنش

شدت پرتوهای ورودی به دوربین قبل و بعد از اعمال بارگذاری (IA و IB) برابرند با

$$I_A = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos \varphi \quad (1)$$

$$I_B = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos(\varphi + \Delta\varphi) \quad (2)$$

I₁ و I₂ شدت پرتوهای بازتابیده شده از آینه ها هستند. φ فاز لکه ها و $\Delta\varphi$ تغییر فاز بعد از اعمال بارگذاری است. در نهایت شدت تصویری که از کم کردن شدت قبل و بعد از اعمال بارگذاری در سیستم کامپیوتر مشاهده می شود برابر است با

$$I = I_B - I_A = 2\sqrt{I_1 I_2} [\cos(\varphi) - \cos(\varphi + \Delta\varphi)] \quad (3)$$

اختلاف فاز اپتیکی بدست آمده برابر است با

$$\frac{\Delta\phi(x,y) - \Delta\phi(x+\Delta x,y)}{2} = \frac{\delta L(x,y)}{\delta x} \cdot \frac{\pi \Delta x}{\lambda} (Kx, y) \quad (4)$$

با فرض اینکه راستای تابش به سطح نمونه (K₁) و بازتابش (K₂) یکی باشد $\frac{\delta L_x}{\delta x}$ و $\frac{\delta L_y}{\delta x}$ تقریباً برابر صفر می شود و خواهیم داشت:

$$\Omega = \frac{4\pi}{\lambda \cos\theta} \frac{\delta L_z}{\delta s} \Delta S \quad (5)$$

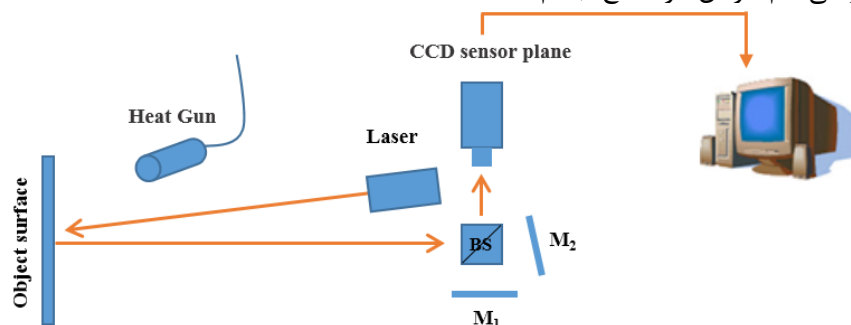
به منظور استفاده از آزمون برش نگاری لیزری در تعیین عیوب زیرسطحی در مرحله اول نمونه هایی از جنس آلومینیوم در دو ضخامت ۳mm و ۵mm آماده و در سطح پشت آنها عیوبی به صورت حفره هایی با عمق و قطرهای مختلف مطابق جدول ۱ ایجاد شد. این نمونه ها تحت تابش یک لیزر دیودی ۶۶۰nm قرار گرفته و بارگذاری توسط یک تفنگ حرارتی انجام شد. نتایج توسط دوربین CCD ضبط شده و بعد از پردازش تصویر توسط نرم افزار، تصویر نهایی بدست آمد.

و عیوب قطعات، در تحقیقاتی دیگر با تغییر چیدمان، از این روش برای مشاهده شکل سطوح مختلف استفاده شده است [۱۱]. همچنین، در حال حاضر از برش نگاری دیجیتالی به طور گسترده در صنعت لاستیک سازی استفاده می شود [۱۲].

در این پژوهش، روش تجربی تعیین عیوب زیر سطحی روی قطعات فلزی با روش برش نگاری لیزری و به کمک بارگذاری حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، نمونه هایی از جنس آلومینیوم در دو ضخامت ۳mm و ۵mm تحت تابش لیزر دیودی قرار گرفته و ارزیابی شده است. عیوب زیر سطحی به صورت حفره هایی با قطر و عمق مختلف در پشت نمونه ایجاد شده اند. سپس تاثیر مقدار بارگذاری حرارتی بر نتایج حاصل از برش نگاری و همچنین میزان حساسیت این روش بررسی شده است. سپس آزمون برش نگاری لیزری با اعمال فازشفتینگ و فرآیند پردازش تصویر انجام شده و سائز عیب بدست آمده از این آزمون تعیین شد.

۲- چیدمان آزمایش

تصویر شماتیک چیدمان استفاده شده برای سیستم برش نگاری در این تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده است. برای اعمال برش نگاری، ابتدا چیدمان آزمایش با رویکرد تداخل سنجی مایکلسون در آزمایشگاه برپا شد. این روش بر پایه تداخل دوجبهه نور لیزر بازتاب شده از سطح جسم قبل و بعد از اعمال بارگذاری و بررسی فریزهای تداخلی برای تشخیص محل عیب است. تصویر حاصل یک تصویر لکه دار است که با کم کردن شدت نور ذخیره شده قبل و بعد از اعمال بارگذاری، برهم نهی و پردازش تصویر یک تصویر هاله دار از سطح ایجاد می شود که نشان دهنده نواحی هم کرنش در سطح جسم است.



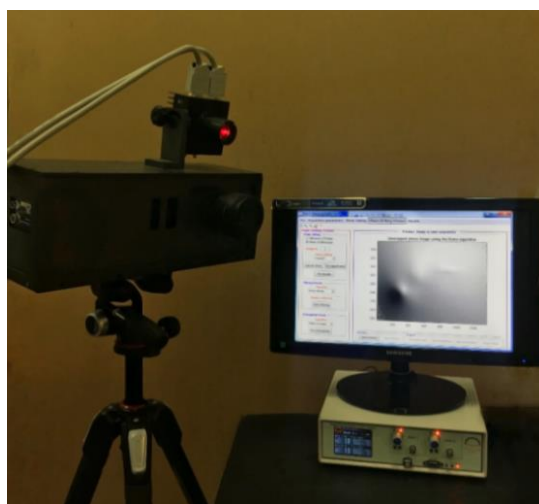
شکل (۱). تصویر شماتیک چیدمان سیستم برش نگاری لیزری استفاده شده برای تعیین عیوب زیر سطحی نمونه هایی با جنس های مختلف

عیوبی به شکل ترک با ابعاد مختلف در پشت آن اعمال شد.

۳- نتایج و بحث

برای اعمال آزمون برش‌نگاری، ابتدا نمونه در فیکسچر مناسب قرار گرفته و سپس بارگذاری حرارتی توسط یک تفنگ حرارتی روی نمونه انجام شد. هرکدام از نمونه‌ها به مدت ۷s تحت تابش قرار گرفت. با استفاده از تفاضل تصاویر شدت قبل و بعد از بارگذاری و پردازش تصویر نهایی، شکلی حاوی فریزهای تداخلی حاصل می‌شود. تصویر نهایی با استفاده از نرم افزار مناسب پردازش شده و نویزهای مختلف آن فیلتر شده است. نتایج برای نمونه با ضخامت ۳mm در شکل (۳) نشان داده شده است.

شکل (۲) دستگاه طراحی شده را نشان می‌دهد. در این پژوهش تاثیر میزان عمق و قطر عیوب در نتیجه‌ی حاصل از برش‌نگاری و همچنین اهمیت نسبت عمق به قطر در ظاهر شدن عیب نمونه با استفاده از این روش مورد بررسی قرار گرفت. سپس برای بهبود کیفیت تصاویر و همچنین بدست آوردن سایز عیوب موجود در نمونه از فازشیفتنگ به روش پنج مرحله ای $\pi/2$ در فرآیند آزمون برش‌نگاری استفاده شد. بدین منظور یکی از آینه‌ها به یک پیزوالکتریک متصل شده و با استفاده از درایور مناسب برای بازه جابجایی فاز صفر تا 2π ، پنج گام ولتاژ به آینه اعمال شد. برای بدست آوردن ولتاژ مناسب برای جابجایی 2π از روش فریز شماری استفاده شد. در نهایت وری تصاویر بدست آمده فیلترینگ اعمال شده و سپس نتایج Unwrapp شدند. برش‌نگاری روی نمونه ای از جنس پلکسی با ضخامت ۶ mm دارای عیوب دایروی و



شکل (۲). دستگاه برش‌نگاری لیزری ساخته شده در این پژوهش

جدول ۱. مشخصات نمونه‌ها و عیوب موجود در آنها برای اعمال برش‌نگاری لیزری

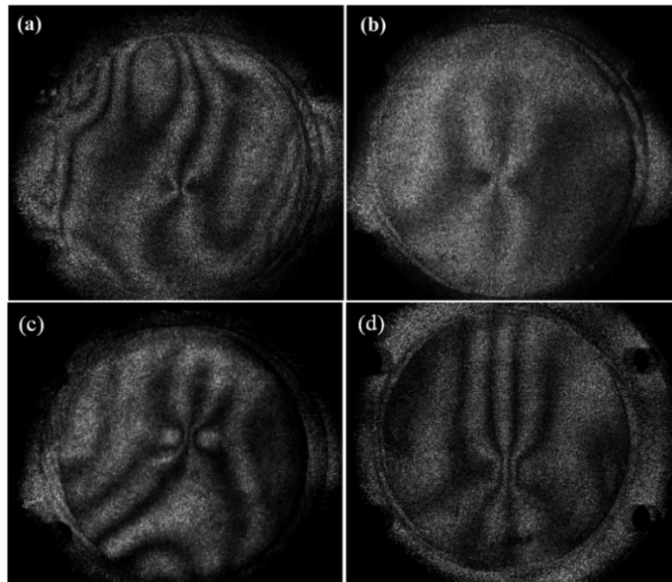
ورقه‌ی آلومینیوم به ضخامت ۳mm	عمق حفره (mm)	۲				
	قطر حفره (mm)	۳	۴	۵	۶	۱۰
ورقه‌ی آلومینیوم به ضخامت ۵mm	عمق حفره (mm)	۴-۳-۲				
	قطر حفره (mm)	۴	۵	۱۰	۱۵	

بررسی شدند. نتایج حاصل در شکل (۵) نشان داده شده است.

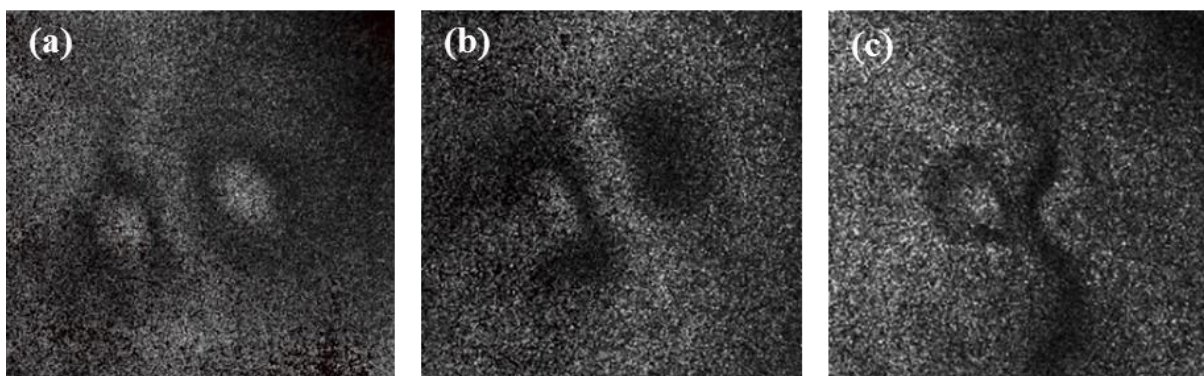
برای عیوب با عمق‌های ۲ و ۳ میلی‌متر بعد از بررسی نتایج بدست آمده از تصاویر برش‌نگاری، عیوب با قطر ۴mm قابل تشخیص نبودند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با کاهش عمق عیوب و همچنین با کم شدن مقدار قطر، قابلیت تصویر برای تشخیص عیب به سرعت کاهش می‌یابد. ارتباط بین قطر حفره و حداقل عمق قابل مشاهده باعث می‌شود تا تنها برخی عیوب قابل شناسایی باشند [۱۳]. کمترین مقدار بدست آمده برای نسبت قطر به عمق در این پژوهش برابر با ۲/۵ است. نتایج نشان می‌دهد، هر چه عمق عیب ایجاد شده کم باشد یا به عبارت دیگر فاصله آن از سطح ارزیابی شده بیشتر باشد تاثیر حرارت ایجاد شده توسط تفنگ حرارتی روی بهم ریختگی

همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است، محل عیوب از طریق به هم ریختگی فریزهای تداخلی مشخص می‌شود. همچنین اندازه تصاویر بدست آمده نیز تا حدودی با ابعاد عیوب متناسب است به طوری که عیوب بزرگتر سبب ایجاد تصاویری با ابعاد بزرگتر شده است. در مرحله بعد، آزمایش برای نمونه‌ی آلومینیوم با ضخامت ۵mm انجام شد. نتایج برای عیوب با قطر ۱۵mm و عمق‌های متفاوت در شکل (۴) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، برای هر سه عیب با عمق مختلف محل خرابی کاملاً در الگوی هاله‌ای مشخص است. قابل ذکر است که اندازه‌ی بهم ریختگی ناشی از عیوب بسیار نزدیک با اندازه واقعی عیب است. برای یافتن کوچکترین عیب قابل شناسایی، با توجه به شرایط آزمایش، قطرهای ۱۰، ۵ و ۴ میلی‌متر نیز



شکل (۳). الگوی فریزهای تشکیل شده حاصل از برش‌نگاری لیزری برای ورقه آلومینیوم به ضخامت ۳mm حاوی عیوب مختلف با عمق ۲mm و قطرهای مختلف (a) ۳mm (b) ۴mm (c) ۵mm (d) ۶mm



شکل (۴). تصاویر حاصل از آزمون غیرمخرب ورقه‌ی آلومینیوم به ضخامت ۵mm و حاوی عیوب دایروی به قطر ۱۵mm و عمق‌های مختلف (a) عمق ۲mm (b) عمق ۳mm (c) عمق ۴mm

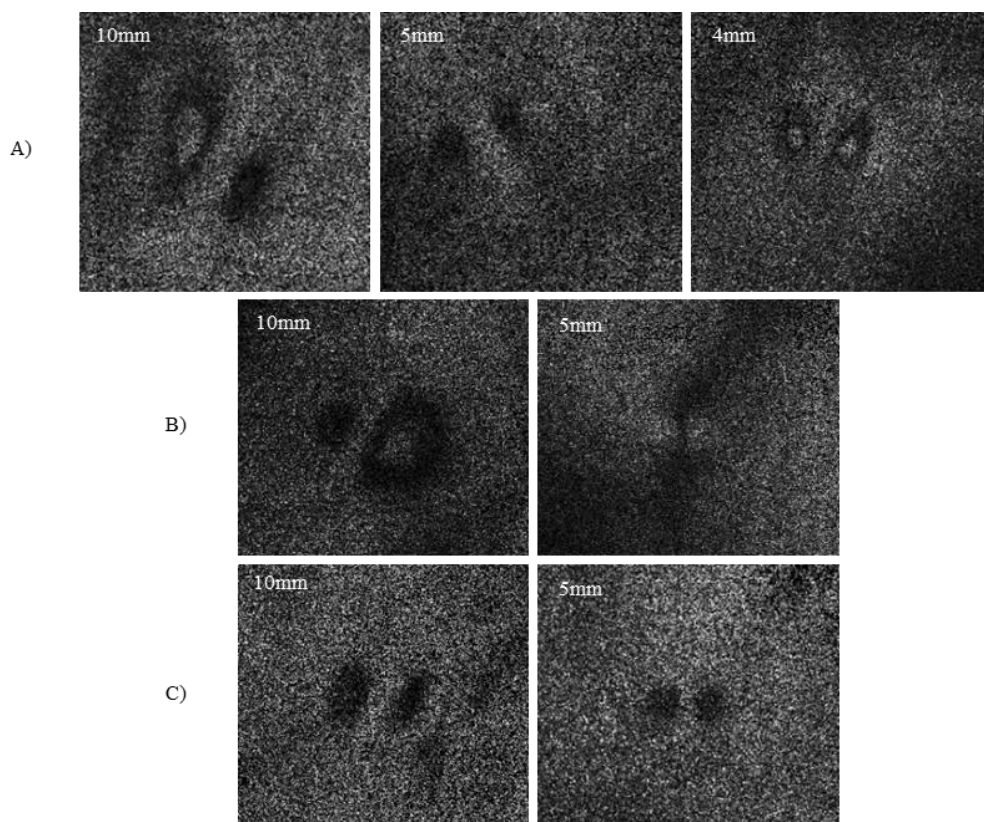
واقعی عیب، ترکی به عرض $0/5$ میلی‌متر و طول 2 سانتی-متر و حفره ای به قطر 12 میلی‌متر است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش ورقه‌های آلومینیوم با دو ضخامت 3 و 5 میلی‌متر دارای عیوبی به شکل حفره با عمق و قطرهای متفاوت توسط آزمون برش‌نگاری لیزر به منظور یافتن عیوب مورد آزمایش قرار گرفتند و تاثیر میزان عمق و قطر عیوب در نتایج بدست آمده و هم چنین اثر ضخامت نمونه بررسی شد. از یک تفنگ حرارتی برای بارگذاری نمونه استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان داد که آنچه در بدست آوردن نتیجه مطلوب و ظاهر شدن عیب نمونه بسیار تاثیرگذار است نسبت اندازه قطر به عمق حفره‌ی ایجاد شده در پشت نمونه است. تا جایی که اگر این نسبت از یک مقدار کمتر باشد. مشاهده‌ی عیوب در نمونه بسیار سخت می‌شود. این مقدار در این پژوهش برای هر دو ضخامت مورد آزمایش تقریباً یکسان و برابر 2.5 بود.

فریزها کاهش می‌یابد. در نتیجه، به دلیل دانه‌ای بودن تصاویر حاصل از برش‌نگاری قابلیت تشخیص عیب روی تصویر توسط اپراتور کم می‌شود. در قطرهای بسیار کوچک نیز در صورت کم بودن عمق عیب از یک مقدار خاص، همین اتفاق تکرار می‌شود. بررسی نتایج مربوط به نمونه با ضخامت 3 mm و 5 mm نشان می‌دهد که کمینه مقدار نسبت قطر به عمق در هر دو نمونه تقریباً یکسان است.

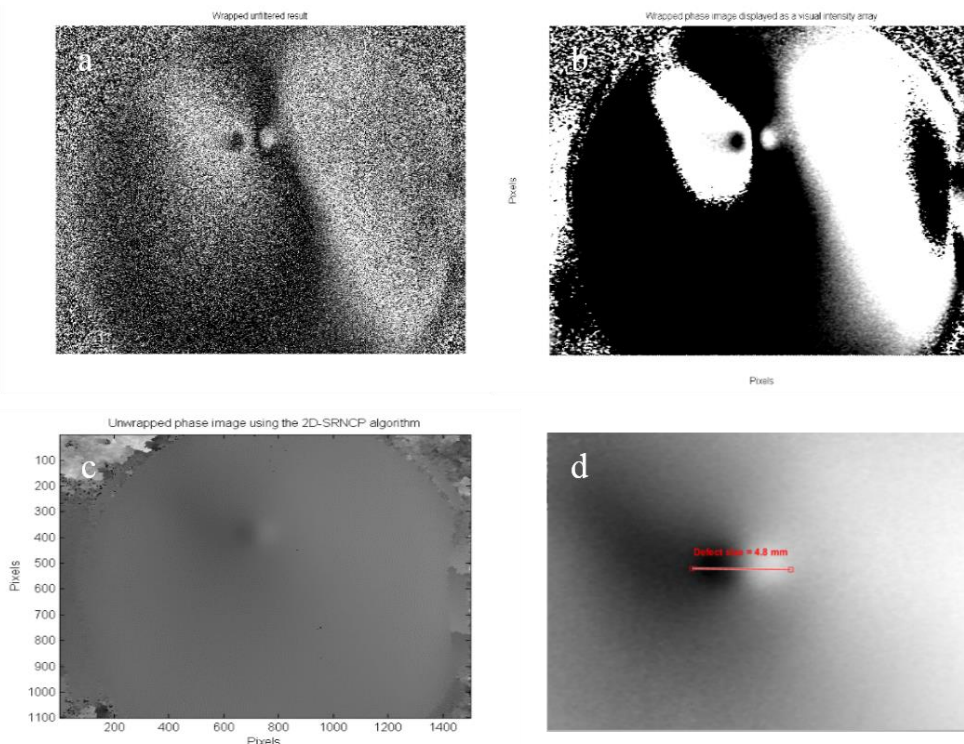
با استفاده از فازشیفتینگ در روند آزمون، نتایج بدست آمده از کیفیت بسیار بالاتری برخوردار بودند. و سائز عیوب با دقت بسیار بالایی تخمین زده شد. شکل (۶) آزمون برش‌نگاری لیزری روی ورقه‌ی پلکسی با ضخامت 6 mm را نشان می‌دهد. اندازه واقعی عیب برابر با 5 mm و اندازه تخمین زده شده $4/8$ mm بود. با اضافه کردن مراحل فازشیفتینگ، فیلترینگ و Unwrapping به سیستم طراحی شده دستگاه قابلیت تشخیص همزمان عیوب در اندازه‌ها و اشکال مختلف را با کیفیت و دقت بسیار بالا بدست آورد. شکل (۷) نتیجه بررسی ورقه ای از جنس پلکسی با ضخامت 6 mm را نشان می‌دهد. اندازه



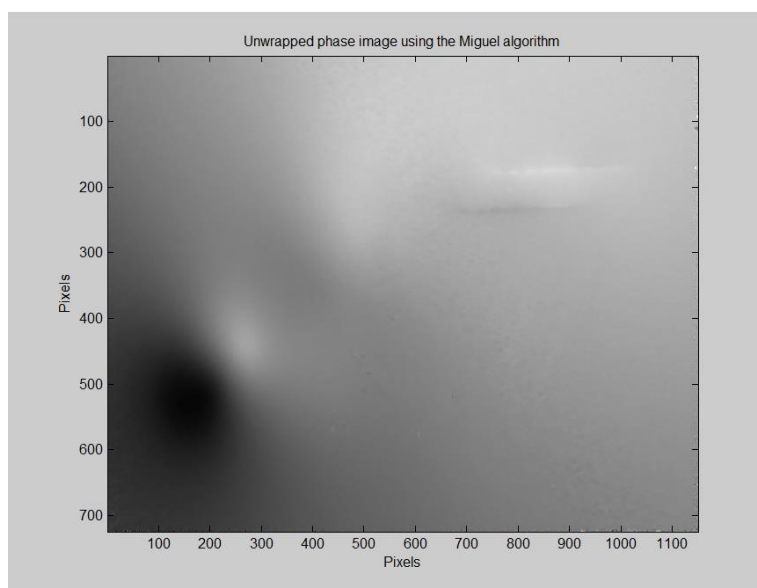
شکل (۵). نتایج آزمون برش‌نگاری لیزری برای ورقه آلومینیوم به ضخامت 5 mm (A) برای حفره ای به عمق 4 mm (B) برای حفره ای به عمق 3 mm (C) برای حفره ای به عمق 2 mm

اندازه‌گیری کرد. هم‌چنین مزیت قابل توجه این دستگاه توانایی بالا در بررسی عیوب در انواع جنس‌ها به خصوص جنس‌های کامپوزیتی است که کاربرد بسیار بالایی در صنعت حمل و نقل و صنعت هواپیمایی دارند.

هم‌چنین با استفاده از دستگاه برش‌نگاری لیزری ساخته شده در این پروژه و با استفاده از فازشیفتینگ و در ادامه فرآیند پردازش تصویر می‌توان عیوب زیرسطحی مختلف در اشکال و اندازه‌های مختلف را شناسایی و با دقت بالایی



شکل (۶). نتایج حاصل از برش‌نگاری لیزری. (a) تصویر بهم ریختگی فریز در محل وجود حفره‌ای به قطر ۵ mm در نمونه‌ی پلکسی با استفاده از فازشیفتینگ. (b) نتیجه حاصل از اعمال فیلترینگ. (c) تصویر بدست آمده از unwrapping. (d) تعیین سائز خرابی موجود در نمونه. اندازه‌ی عیب تعیین شده با استفاده از برش‌نگاری لیزری ۴/۸ mm تخمین زده شد.



شکل ۷. تعیین عیوب زیرسطحی ورقه‌ی پلکسی شامل حفره‌ی به قطر ۱۲ mm و ترکی به عرض ۰/۵ میلی‌متر و طول ۲ سانتی‌متر

8. Newman J.W., 2008, "Aerospace NDT with advanced laser shearography", Proceedings of the seventeenth world conference on nondestructive testing, Shanghai, China, 25-8.
9. Groves, R.M., James, S.W., Tatam, R.P., 2001, "Full surface strain measurement using shearography", Proc. SPIE 4448, 142-52.
10. Nelson, D.V., "Residual Stress Determination by Hole Drilling Combined with Optical Methods", Exp. Mech. 50, 145-58, 2010.
11. Groves, R.M., James, S.W., Tatam, R.P., 2004, "Shape and slope measurement by source displacement in shearography", Opt. Lasers Eng., 41, 621-34.
12. Zastavnik, F., Pyl, L., Gu, J., Sol, H., Kersemans, M., Van Paeppegem, W., 2014, "Comparison of shearography to scanning laser vibrometry as methods for local stiffness identification of beams strain", 50, 82-94.
13. Liu, Z., Gao, J., Xie, H., Wallace, Ph., 2011, "NDT capability of digital shearography for different materials", Optics and Lasers in Engineering, 49, 1462-1469.

۴- مراجع

1. Xie, H.M., Kishimoto, S., Asundi. A., 2000, "In-plane deformation measurement using the atomic force microscope moire method", Nanotechnology, 11(1), 24-9.
2. Allgaier, M., Ness, S., McIntire, P., Moore, P., 1993, "Nondestructive testing handbook: Visual and optical testing", ASNT, vol. 8.
3. Hung, Y.Y., 1982, "Shearography: a new optical method for strain measurement and non-destructive testing", Opt. Eng., 21, 391-5.
4. Steinchen, W., Yang, L., 2003, "Digital Shearography - Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry", SPIE Press, Bellingham, Washington, USA.
5. He, Y.M., Tay, C.J., Shang, H.M., 1999, "Digital phase-shifting shearography for slope measurement", Opt. Eng., 38, 1586-9.
6. Schuth, M., Vossing, F. Yang, L., 2010, "Shearographic NDT-Measuring Systems in Theory and Application (Endoscope for Nondestructive Test)", 2nd International Symposium on NDT in Aerospace.
7. Francis, D., Tatam, R.P., Groves, R.M., 2010, "Shearography technology and applications: a review", Meas. Sci. Tech., 21, 1-29.

Inspection of metallic samples defects in nondestructive testing by laser shearography with thermal loading

A. Chehrghani^{1*}, A. Fotovat¹, M. Halajan¹, M.J. Torkamany¹, S.H. Nabavi¹

¹Iranian National Center for Laser Science and Technology;

* a_chehrghani@yahoo.com

Abstract

Digital shearography is widely used as a nondestructive inspection method in detection of subsurface defects and strain measurement in experimental mechanics. In addition, full field measurement and low vibration isolation requirements cause to higher application of this method in quality control applications. In this paper, the application of digital shearography in inspection of metallic samples has been studied. The subsurface defects of aluminum samples have been investigated by using a proper setup of digital shearography. The thickness of samples is 3mm and 5mm and the shear size in experiments is equal to 4mm. The samples are irradiated by a 660nm diode laser and recorded shearograms before and after thermal load have been analyzed by means of appropriate software. The results showed that, the diameter to depth ratio of defects employs important role in detectability of subsurface defects. By using this method, the minimum detectable diameter of defect is 2.5 times of its depth.

Keywords: optical methods, laser shearography, metallic samples, finite element modeling