مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1396، دوره 17، شماره 9، ص‌ص 372-380

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحلیل پارامترهای آزمون تداخل‌سنجی لیزری برای ارزیابی عیوب در مواد مرکب زمینه پلیمری

داود اکبری[1*]، حمیدرضا آسمانی[2]، ناصر سلطانی[3]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
* تهران، صندوق پستی 111-14115، daakbari@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 17 تیر 1396
پذیرش: 28 مرداد 1396
ارائه در سایت: 17 شهریور 1396

کلید واژگان:
تداخل‌سنجی لیزری
بازرسی غیرمخرب
مواد مرکب زمینه پلیمری
عیوب زیر سطحی

چکیده

تداخل‌سنجی لیزری، یکی از روش‌های نوین در اندازه‌گیری مشتقات جابجایی سطحی است که قادر است گرادیان جابجایی‌های بسیار کوچک در ابعاد میکرومتر بر متر را اندازه‌گیری نموده و محدوده‌ی گسترده‌ای از سطح جسم را به‌طور همزمان مورد مطالعه قرار دهد. از پتانسیل این روش می‌توان به‌طور بسیار کارآمدی در انجام آزمون‌های غیرمخرب صنعتی به خصوص در مواد مرکب استفاده نمود. با این حال، استفاده مناسب از این روش، مستلزم شناسایی پارامترهای موثر در آن و آشنایی با نحوه کنترل آنها در آزمون می‌باشد. اندازه‌ی برش و میزان بارگذاری کششی موردنیاز، از جملهٔ مهم‌ترین پارامترهای این روش هستند که قابلیت شناسایی عیوب بسیار وابسته به انتخاب صحیح آن‌هاست. در این مقاله، با معرفی روش مذکور و توسعه کاربرد آن در ارزیابی غیرمخرب مواد کامپوزیتی، تأثیر کمّی پارامترهای تأثیرگذار در شناسایی عیوبی با اندازه و عمق‌های مختلف در مواد مرکب مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور پس از آماده‌سازی چیدمان و اثبات کارایی آن، نمونه‌هایی از مواد مرکب زمینه پلیمری دارای عیوبی با اندازه و زاویه‌های مختلف، با به کارگیری اندازه بارهای متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته است. با بررسی نتایج حاصله، محدوده مجاز بارگذاری برای شناسایی ترک‌های عمودی تعیین شده و سپس با اعمال اندازه برش‌های مختلف در مجموعه چیدمان آزمون، مناسب‌ترین اندازه برای تشخیص پذیری عیوب در نمونه‌ها بدست آمده است. در ادامه تأثیر موقعیت قرارگیری عیب نسبت به راستای بارگذاری مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی نتایج نشان دادند که بهترین پاسخ آزمون زمانی حاصل می‌گردد که اندازه برش در حدود اندازه ترک‌های احتمالی تنظیم شده و بارگذاری نیز در محدوده‌ی تعیین شده باشد.

Analysis of Laser Interfrometry Parameters in the Evaluation of Defects in the Polymer Matrix Composites

Davood Akbari[1*], Hamid-Reza Asemani[2], Naser Soltani[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran
*P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, daakbari@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 July 2017
Accepted 19 August 2017
Available Online 08 September 2017

Keywords:
Laser interferometry
Non-destructive testing
Polymer Matrix Composite
Sub surface cracks

ABSTRACT

Laser interferometry is one of the most applicable methods of calculating the surface displacement derivatives that can visualize very small displacement gradients, in µm/m level, on a relatively large area of a sample surface at once. This method can be beneficially used in industrial non-destructive testing of materials, especially composites. However, getting an acceptable result of this inspection method depends on identification and proper adjustment of the test parameters to a great extent. Shear size and loading amount are the most important factors affecting crack detection ability in laser interferometry technique, both of which are investigated in this paper. In this regard, several composite specimens with several cracks in different lengths have been prepared and tested with different parameters. Various tensile loadings are applied to specify the allowable limit load in different shear sizes. Eventually, the effects of the crack inclination relative to the load direction are studied. The test results show that the best responses are observed with a shear size equal to the approximated defect sizes and a limited band of the loading range can be used to reveal the cracks.

1- مقدمه

مواد مرکب با زمینه پلیمری (PMCs) رایج‌ترین مواد کامپوزیتی مورد استفاده در صنایع هستند که از پلیمرهایی نظیر اپوکسی، پلی استر و اورتان تقویت شده با الیاف کم قطر شیشه، گرافیت، آرامید و بور ساخته می‌شوند. هزینه کم، استحکام بالا و قوانین ساخت آسان آن‌ها باعث رواج هرچه بیشتر این نوع کامپوزیت‌ها شده است. در مواد کامپوزیتی با توجه به ماهیت ناهمگن

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

D. Akbari, H.-R. Asemani, N. Soltani, Analysis of Laser Interfrometry Parameters in the Evaluation of Defects in the Polymer Matrix Composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 372-380, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.9.39.5]

و شرایط ویژه تولید، احتمال وجود عیوبی نظیر خلل و فرج، عدم چسبندگی، لایه‌ای شدن و همچنین انواع ترکها بیشتر از سایر مواد است. این عیوب ممکن است در لایه‌های داخلی ماده ایجاد گردند که در بازرسی‌های چشمی قابل مشاهده نبوده و باعث کاهش چشمگیر قابلیت‌های ماده مرکب می‌شوند. از این رو توسعه روشهای بازرسی مخصوص مواد مرکب، رواج بسیاری پیدا کرده است. در این میان، آزمون‌های غیرمخرب نقش بسیار مهمی در بررسی یکپارچگی سازه‌های کامپوزیتی دارا هستند.

تداخل‌سنجی لیزری روش بازرسی مناسبی است که با دارا بودن سرعت تشخیصی بالا، قابلیت تشخیص انواع عیوب در سطوح داخلی مواد مرکب را ایجاد می‌کند. این روش که برشنگاری یا تداخل سنجی برشی الگوی لکه دار[1] نامیده می‌شود، یک روش بازرسی نوری است که با استفاده از اصول تداخل‌سنجی لیزری، قابلیت بازرسی قطعات را به‌صورت غیرتماسی و غیرمخرب ایجاد می‌کند[1]. برشنگاری نسبت به سایر روش‌های تداخل‌سنجی دارای مزایای متعددی است که از جمله آن‌ها می‌توان به عدم نیاز به پرتو نور مرجع، کاهش طول همدوسی مورد نیاز برای لیزر و محاسبه مستقیم کرنش‌های سطحی اشاره نمود [2]. با حذف پرتو مرجع در این روش، حساسیت چیدمان نوری نسبت به ارتعاشات محیطی بسیار کاهش می‌یابد که این موضوع باعث افزایش روزافزون استفاده از این روش در عیب‌یابی و بازرسی غیرمخرب صنعتی شده است.

در روش برشنگاری، از تداخل‌سنجی الگوی لکه‌دار یک منبع نور همدوس که از سطح جسم بازتاب شده است استفاده می‌شود. پرتو بازتاب شده بعد از عبور از داخل دستگاه تداخل‌سنج، وارد دوربین تصویربرداری می‌شود و به شکل یک الگوی لکه‌ای ذخیره می‌شود. با تغییر شکل جسم، شدت نور ذخیره شده در الگوی لکه‌دار، مقداری تغییر می‌کند. با کم کردن شدت نور الگوی لکه دار مربوط به حالت‌های اولیه و تغییر شکل یافته، الگوی هاله‌ای تولید می‌شود. تفسیر الگوهای هاله‌ای، وجود و یا عدم وجود عیوب را توضیح می‌دهد.

روش برشنگاری بر پایه تحقیقات و توسعه روی روش نوری هولوگرافی توسط لیندرتز در سال 1970 شکل گرفت و در ابتدا تداخل‌سنجی الگوی لکه‌ای تصویر برشی[2] نامیده شد. او از این روش برای محاسبه مشتقات جابجایی سطح در راستای عمود بر صفحه بهره برد. سه سال بعد لیندرتز به همراه همکار خود باترز، این روش را برای محاسبه ممان خمشی در یک تیر به کار بردند [3]. نکته قابل توجه در این کار، استفاده از تداخلگر مایکلسون برای ایجاد تصویر برشی است. بسیاری از تحقیقات بعدی در این زمینه با استفاده از تداخلگر گوه‌ای شیشه‌ای انجام شده است. توه و همکاران از روش برشنگاری برای مشخص کردن ابعاد و عمق عیوب در ورق‌های کامپوزیتی پلاستیکی با الیاف شیشه استفاده نمودند [4]. در این کار آن‌ها نمونه را در خلاء قرار داده و گرادیان جابجایی ایجاد شده در سطح را بررسی کردند. وجود گرادیان شدید جابجایی سطحی در مناطق معیوب، ایده اصلی کاربرد روش برشنگاری در یافتن عیوب توسط این محققین و سایر محققین پس از آنان می‌باشد. بدین ترتیب، با انجام بارگذاری در نمونه دارای عیب و بررسی گرادیان جابجایی خارج از صفحه، عیوب خود را به شکل هاله‌های فشرده در الگوی هاله‌ای نشان می‌دهند. آزمون برشنگاری با استفاده از نور لیزر با طول موج‌های متفاوت، توسط کاستل و همکاران انجام شد[5].

فیندیس و همکاران در سال 2004 به مقایسه روش‌های تداخل سنجی لکه‌ای و برشنگاری پرداختند [6]. روزک و همکاران در سال 2006 روشهای آزمون فراصوتی و روش برشنگاری را برای تشخیص عیوب ناشی از ضربه در برخی نمونه‌های کامپوزیتی مورد مقایسه قرار دادند و نتیجه گرفتند که برشنگاری، روش مناسب تری برای تشخیص اینگونه عیوب است [7]. هانگ و همکاران نیز با استفاده از ایجاد تنش‌های حرارتی، به بررسی عیوب در بتن مسلح، ورق آلومینیمی و لوله‌های PVC و فولادی با استفاده از روش برشنگاری پرداختند [8].

در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی روی روش برشنگاری، بهبود و توسعه کاربردهای آن برای عیب یابی انجام شده است که همگی بر قابلیت‌های این روش تاکید دارند [10,9]. اما بیشتر این تحقیقات به اثبات قابلیتهای عیب یابی در شرایط خاص و یا توسعه روش برشنگاری پرداخته‌اند [12,11].

اکبری و همکاران در سال 2013 روش بارگذاری حرارتی را برای تشخیص عیوب در پلیمرها بررسی کردند [13]. محمدی و اکبری در کار دیگری با استفاده از مدل‌سازی هاله‌های برشنگاری معیاری برای میزان بارگذاری مورد نیاز در عیب یابی ارایه کردند [14].

در این میان پارامترهای موثر بر عیب‌یابی و معرفی کمّی آنها آن‌ها به خصوص برای ترک‌ها مورد توجه چندانی قرار نگرفته است. ابعاد ترک، موقعیت قرار گیری آن، عمق ترک و بر همکنش ترک‌ها از عواملی تاثیر گذار بر نتایج عیب‌یابی هستند. در میان پارامترهای روش آزمون برشنگاری، میزان اندازه برش یکی از پارامترهای بسیار مهم در تعیین و تفسیر نتایج است که در اکثر تحقیقات انجام گرفته، برابر مقدار ثابتی در نظر گرفته شده و اثر آن درنظر گرفته نشده است.

در این مقاله، روش برشنگاری دیجیتالی برای تشخیص عیوب زیرسطحی در مواد مرکب زمینه پلیمری به‌کار رفته است. اندازه‌گیری ترک و تاثیر موقعیت قرارگیری آن بر نتایج آزمون از فعالیت‌های انجام شده در این مقاله است. در این راستا، عیوب مختلفی در نمونه‌های آزمون ایجاد شده و با تغییر اندازه برش، مورد بررسی قرار گرفته اند. برای هر ترک، محدوده اندازه بار کششی یا تنش متوسط مناسب برای تشخیص پذیر بودن آن استخراج شده است. بدین منظور نمونه‌های مشابه با ترک‌هایی با اندازه و موقعیت‌های مختلف ساخته شده و با چند اندازه برش تحت نیروهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته و محدوده‌ای از نیرو که ترک‌ها در آن قابل تشخیص هستند مشخص شده است. با تعیین محدوده مناسب بارگذاری، می‌توان تشخیص پذیر بودن عیوب را در روش مورد مطالعه تضمین کرد و یک الگوی بهینه از ترکیب بار- اندازه برش برای تشخیص سایر ترک‌های احتمالی پیش‌بینی نمود.

2- اصول حاکم بر روش برشنگاری

2-1- شرح روش

چیدمان نوری مورد استفاده در روش تداخل‌سنجی لیزری در "شکل 1" به صورت شماتیک نشان داده شده است. در این روش نمونه مورد آزمایش با استفاده از نور واگرا شده یک منبع لیزر همدوس تکرنگ، روشن می‌شود و با استفاده از یک دوربین که برای ثبت و پردازش تصاویر به یک کامپوتر متصل شده، تصویربرداری می‌شود.

دستگاه برش تصویر (تداخلگر مایکلسون) جلوی لنز دوربین قرار گرفته و موجب تداخل دو پرتو نور غیر موازی بازتاب شده از دو نقطه متفاوت نمونه و درنهایت ایجاد تصویر تداخل لکه‌ای در لنز دوربین می‌شود. نمونه‌ای از یک تصویر دیجیتالی تداخل لکه‌ای در "شکل 2" نشان داده شده است. توزیع

[1] Speckle Patterns
[2] Image-Shearing-Speckle-Pattern Interferometer

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.9.39.5]

نقاط تیره و روشن در تصویر به دلیل ناصافی سطوح نمونه‌ها نسبت به اندازه طول موج لیزر، به صورت تصادفی خواهد بود.

وقتی که نمونه مقدار کمی تغییر شکل می‌دهد، الگوی تداخلی نشان داده شده در "شکل 2" اندکی تغییر می‌کند. با کم کردن دیجیتالی روشنایی نقاط تصویر مربوط به حالت‌های اولیه و تغییر شکل یافته، الگوی‌هاله‌ای یا همان تصویر برشی[1] تولید می‌شود که مشتقات تغییر شکل سطح را نمایش می‌دهد از این رو به این روش تداخل سنجی در اصطلاح برشنگاری[2] گفته می‌شود. "شکل 3" نمونه‌ای از الگوی هاله‌ای مربوط به بارگذاری خارج از صفحه یک صفحه دایره‌ای را نشان می‌دهد.

2-2- تداخلگر مایکلسون اصلاح شده

همان‌طور که از "شکل 1" نشان داده شده است، در تداخلگر مایکلسون با تغییر زاویه اندک یکی از آینه‌ها، پرتوهای لیزر بازتابی از دو نقطه روی سطح نمونه، روی یک نقطه از صفحه دوربین CCD متمرکز شده بدین ترتیب با استفاده از تداخلگر مایکلسون اصلاح شده، می‌توان از خاصیت تداخلی پرتو دو نور بازتاب شده از تصویر استفاده نمود. علت تشکیل نقاط روشن و تیره در تصویر تداخلی، تداخل‌های سازنده و مخرب پرتوهای نور می‌باشد. با تغییر زاویه آینه در تداخلگر مایکلسون می‌توان میزان فاصله دو تصویر و یا در اصطلاح اندازه برش را تنظیم نمود. همچنین با استفاده از یک محرک پیزوالکتریک در این تداخلگر می‌توان تکنیک جابجایی فاز برای محاسبه فاز

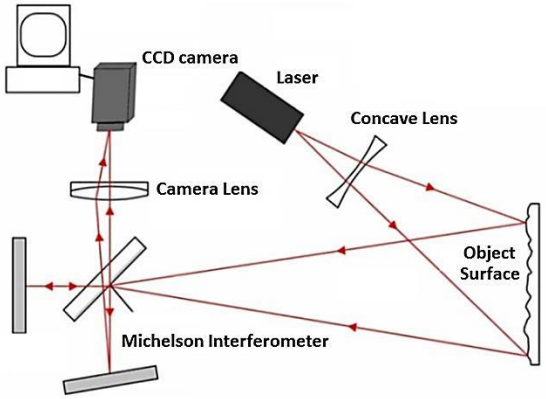


Fig. 1 Shearography Set-up system for out-of plane measurement

شکل 1 شماتیک چیدمان برشنگاری برای اندازه‌گیری جابجایی خارج از صفحه

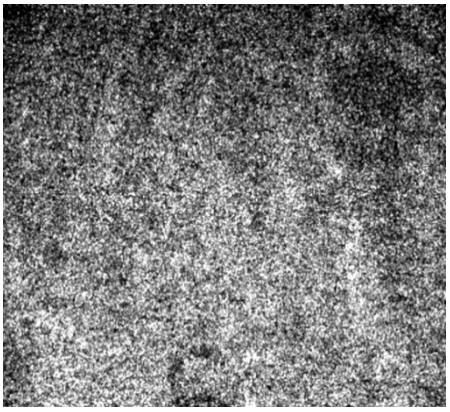


Fig. 2 Spackle pattern formation in an interferometery test

شکل 2 الگوی تداخل لکه‌ای حاصل از آزمون تداخل‌سنجی لیزری

[1] Shearogram
[2] Shearography

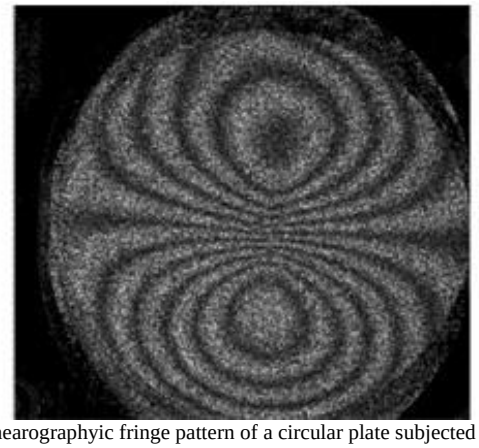


Fig. 3 Shearographyic fringe pattern of a circular plate subjected to an out-of plane deformation

شکل 3 الگوی هاله‌ای حاصل از آزمون تداخل‌سنجی لیزری برای یک صفحه دایره‌ای با بارگذاری خارج از صفحه

تصویر را به کار برد.

2-3- معادلات حاکم

شدت نور بوجود آمده در تصویر دوربین را می‌توان براساس معادله (1) بیان کرد:

$$I = I_0[1 + \mu\cos(\emptyset)] \tag{1}$$

که در آن I توزیع شدت نور الگوی هاله‌ای در صفحه تصویر دوربین، I_0 شدت نور متوسط زمینه، μ مدول تداخل و $\emptyset$ اختلاف فاز تصادفی بین پرتوهای تصاویر برش خورده در هر نقطه است. از معادله (1) و با توجه به تصادفی بودن اختلاف فاز $\emptyset$ تصادفی بودن الگوی لکه‌ای کاملاً مشهود است.

با اعمال بارگذاری و تغییر شکل کوچک نمونه، الگوی لکه‌ای نیز مقداری تغییر می‌کند که با معادله زیر قابل بیان است:

$$I' = I_0[1 + \mu\cos(\emptyset + \Delta)] \tag{2}$$

که در آن I' توزیع جدید شدت نور الگوی هاله‌ای و Δ تغییر فاز هر نقطه در اثر تغییر شکل نسبی است. با محاسبه تفاضل شدت نورهای I و I'، شدت نور وابسته به تغییر شکل به روش زیر محاسبه می‌گردد:

$$I_d = 2I_0\mu\sin(\emptyset + \frac{\Delta}{2})\sin(\frac{\Delta}{2}) \tag{3}$$

که در آن I_d شدت نور در هر پیکسل اندازه‌گیری می‌شود و براساس آن جابجایی سطح به‌دست خواهد آمد. از آن‌جا که تصویر نمی‌تواند مقادیر روشنایی منفی اختیار کند، قدرمطلق I_d برای نمایش الگوی هاله‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [11].

اختلاف فاز Δ به‌وجود آمده، ناشی از اختلاف در مسیر نور طی شده از دو نقطه جسم تا صفحه دوربین است. برای جهت برش در راستای x اختلاف فاز بر اساس جابجایی در راستاهای x ، y و z از رابطه زیر بدست می‌آید [12]:

$$\Delta_x = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)[A\frac{\partial u}{\partial x} + B\frac{\partial v}{\partial x} + C\frac{\partial w}{\partial x}]\delta x \tag{4}$$

که در آن λ طول موج لیزر و u ، v و w جابجایی در راستای x ، y و z و δx اندازه برش هستند. اگر ابعاد هندسی نمونه در مقایسه با فاصله آن تا منبع نور کوچک باشد، پارامترهای حساسیت به طور تقریبی از معادلات زیر محاسبه می‌شوند.

$$A = \sin\alpha$$
$$B = \sin\beta$$
$$C = (1 + \cos\gamma) \tag{5}$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.9.39.5]

که در آن α و β به ترتیب زوایای تابش در صفحه z-y و x-z هستند و γ زاویه بین پرتو تابش و محور z ها است.

در بسیاری از کاربردهای برشنگاری به عنوان یک روش آزمون غیرمخرب، فقط محاسبه جابجایی خارج از صفحه ضروری است. این اطلاعات با قرار دادن چیدمان نوری به نحوی که پرتو لیزر عمود بر سطح آزمون تابانده شده و زوایای α و β نیز برابر صفر باشند قابل دستیابی است. در حالتی که برش در جهت x باشد داریم:

$$\Delta_x = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\left(C\frac{\partial w}{\partial x}\right)\delta x \tag{6}$$

بنابراین با ساده سازی برای مشتق جابجایی خارج از صفحه w داریم:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta_x}{4\pi\delta x} \tag{7}$$

رابطه اخیر نشان می‌دهد که مشتق جابجایی خارج از صفحه (شیب) به طور مستقیم با اختلاف فاز هاله‌ها در روش برشنگاری ارتباط دارد و از این رو می‌توان با مشاهده و تحلیل هاله‌های به دست آمده، شیب ایجاد شده ناشی از بارگذاری را در نقاط مختلف جسم مشاهده و اندازه‌گیری کرد. از طرفی تمرکز جابجایی و در نتیجه شیب بیشتر در یک منطقه نشانگر وجود ناپیوستگی است. در حقیقت هرچه هاله‌های ایجاد شده نزدیکتر و متراکم‌تر باشد، اندازه عیب بزرگتر و یا عمق آن کمتر است. انواع ترک‌ها، ناپیوستگی‌های زیر سطحی، سوراخ‌های داخلی و مُکها، از انواع عیوبی هستند که می‌توان به کمک برشنگاری دیجیتالی آن‌ها را تشخیص داد.

3- ایجاد چیدمان و نتایج آزمایشگاهی

در این تحقیق از روش برشنگاری یا تداخل‌سنجی لیزری، برای ارزیابی ترک‌های زیرسطحی در مواد مرکب زمینه پلیمری استفاده شده است. برای بررسی قابلیت این روش در یافتن عیوب، چهار نمونه مستطیلی از جنس کامپوزیت پایه پلیمری ساخته شد. مشخصات مکانیکی نمونه‌ها در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1 خواص مکانیکی کامپوزیت با ماتریس پلیمری

Table 1 Material properties of PMC

خواص	الیاف	ماتریس
مدول الاستیسته (GPa)	71.7	3.21
مدول برشی (GPa)	28.9	1.2
چگالی (kg/ m^3)	2540	1200
نسبت حجمی	35	65

مرحله بعد، ایجاد ترک‌هایی با ویژگی مشخص در نمونه‌های کامپوزیتی می‌باشد. از این رو در ابتدا برای ارزیابی قابلیت شناسای ترک‌هایی با ابعاد مختلف، ترک‌ها با طول‌های متفاوت 5 ، 7.5، 10، 15 و 20 میلی‌متر در دو نمونه ایجاد شده است. تمام ترک‌ها در موقعیت 90 درجه نسبت به محور طولی و با عرض 0.2 میلی‌متر ایجاد شدند. "شکل 4" شماتیک موقعیت ترک‌های ایجاد شده در دو نمونه را نشان می‌دهد.

در گام بعد به بررسی قابلیت شناسایی ترک‌ها با موقعیت‌های مختلف پرداخته شده است. با توجه بارگذاری و جهت برش ثابت در روش عیب‌یابی برشنگاری، زوایای متفاوت ترک در واقع نماینده موقعیت‌های مختلف قرار گیری ترک خواهند بود. از این رو دو نمونه با ترک‌هایی به طول 15 میلی‌متر و زوایای صفر، 15، 30، 45، 60 و 70 درجه نسبت به محور طولی ساخته شد.

"شکل 5" دو نمونه پلیمری ساخته شده با ترک‌های 15 میلی‌متری در زاویه‌های مختلف را نمایش می‌دهد. همان‌طور که بیان شد روش برشنگاری قابلیت تشخیص عیوب حتی در مواردی که جسم دارای رنگ نیز باشد داراست و نیازی به از بین بردن رنگ نمی‌باشد. بنابراین برای بررسی این موضوع همچنین قابلیت مناسب تر بازتاب نور طرف مورد آزمایش نمونه‌ها با رنگ طوسی رنگ آمیزی شده است.

3-1- چیدمان تجهیزات نوری

چیدمان وسایل نوری در آزمایش انجام شده در "شکل 6" نشان داده شده است. نور بازتاب شده لیزر از سطح نمونه وارد مجموعه ساخته شده برای آزمون برشنگاری می‌شود. این مجموعه شامل یک دوربین CCD 3.2 مگاپیکسلی، جداکننده پرتومکعبی 50-50 و دو آینه مسطح برای طول موج‌های بین 400 تا 700 نانومتر با سطوح دارای پوشش نقره می‌باشد. یکی از آینه‌ها به نگه دارنده سینماتیک مجهز است که قابلیت تغییر زاویه با دقت بسیار بالا را فراهم می‌کند و در تغییر اندازه و جهت برش کاربرد دارد.

برای منبع نورانی از لیزر همدوس هلیوم نئون رنگ قرمز با طول موج 632.8 نانومتر و توان 30 میلی وات استفاده شده است. پرتو نور لیزر با استفاده از عدسی واگرا کننده بر روی نمونه تابانده شده است. صافی سطح کلیه قطعات اپتیکی به کار رفته در آزمایش با دقت $\lambda/4$ می‌باشد. مجموعه چیدمان به‌کار رفته در این آزمایش در "شکل 6" نشان داده شده است.

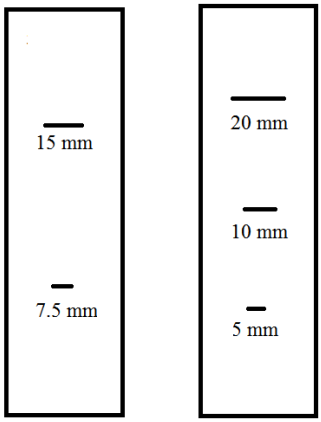


Fig. 4 Schems of the specimens with 5, 7.5, 10, 15 and 20 mm crack size

شکل 4 شماتیک نمونه های پلیمری ساخته شده با ترک‌های 5 ، 7.5، 10، 15 و 20 میلی‌متری

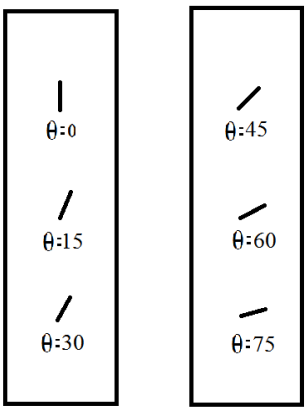


Fig. 5 Schems of the specimens with 15mm cracks with different angles of 0, 15, 30, 45, 60 and 75 Degrees

شکل 5 شماتیک نمونه‌های پلیمری ساخته شده با ترک‌های 15 میلیمتری در زوایای صفر، 15، 30، 45، 60 و 75 درجه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.9.39.5]

یکی از موارد بسیار مهم در آزمون برشنگاری، انتخاب صحیح نوع بارگذاری اعمالی برای آشکارسازی ترک‌ها است. عمده روش‌های به‌کار رفته در تحقیقات قبلی بر پایه آشکارسازی عیوب صفحه‌ای نظیر جدایش لایه‌ای و یا عدم چسبندگی بین لایه‌ها بوده است. از این رو بارگذاری به‌کار رفته از نوع مکش خلاء و یا بارگذاری حرارتی است. اما در این تحقیق به منظور آشکار شدن ترک‌ها (عیوب خطی) استفاده از این نوع بارگذاری چندان کارایی ندارد. از این رو، با ساخت و تجهیز یک نمونه فیکسچر کشش بسیار دقیق، نمونه‌ها تحت بارگذاری کشش تک محوره کنترل شده قرار گرفتند.

بارگذاری کششی یکنواخت اعمال شده به قطعه، باعث تغییر شکل سطح قطعه در تمامی نقاط می‌شود، اما در نقاطی که در نزدیکی ترک هستند، این تغییر شکل متمرکز شده و دارای گرادیان شدیدی است. این گرادیان جابجایی که شامل مشتقات اول جابجایی می‌شود، توسط روش برشنگاری قابل شناسایی است. برای تعیین قابلیت شناسایی روش برشنگاری در بارگذاری اعمالی، هر نمونه تحت اندازه بارهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته و میزان بار مناسب جهت شناسایی ترک مشخص شد.

تعیین اندازه برش نیز یکی دیگر از عوامل تاثیر گذار در روش برشنگاری است که می‌بایست تاثیر آن مورد مطالعه قرار گیرد. بدین منظور آزمایش‌های شناسایی عیوب در اندازه برش‌های مختلف 3، 5، 8، 10 و 13 میلی‌متر تکرار شده‌اند. تمامی اندازه ترک‌ها، زاویه ترک‌ها، اندازه برش‌ها و بارهای اعمالی مورد بررسی در این تحقیق، در جدول 2 لیست شده است.

4- مشاهده و بررسی نتایج

بعد از آماده‌سازی چیدمان و قرار دادن قطعات در دستگاه بارگذاری، منبع نور لیزر بر روی موقعیت تقریبی ترک مورد مطالعه روی طرف دیگر نمونه (از سمتی که ترک قابل مشاهده نیست) تنظیم می‌گردد. بدین ترتیب بعد از استفاده از لنز واگرا کننده، طرف پشتی نمونه در اطراف ترک توسط نور لیزر روشن می‌شود. در این وضعیت تصویر اولیه از نمونه گرفته می‌شود.

تصویر گرفته شده الگوی لکه‌ای مشابه "شکل 2" حاوی اطلاعات قبل از تغییر شکل نمونه می‌باشد. اعمال نیرو به نمونه باعث ایجاد تغییر شکل اندک در آن می‌شود که این تغییر شکل در نواحی اطراف ترک به علت تمرکز تنش، بیشتر از بقیه نقاط است. تصویر دوم در این وضعیت از نمونه گرفته می‌شود که حاوی اطلاعات مربوط به توزیع تغییر شکل نمونه است. با تفاضل مقادیر روشنایی پیکسل به پیکسل تصویر الگوی هاله‌ای تشکیل می‌شود که روشنایی این تصویر براساس معادله (3) محاسبه می‌گردد.

ترم $\sin(\emptyset + \Delta/2)$ باعث ایجاد نویز شدید در تصویر می‌شود. برای حذف نویز و محاسبه الگوی فازی در تصاویر هاله‌ای که فقط شامل اطلاعات جابجایی نقاط باشد، روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش‌ها مبتنی بر انتقال فاز است که در سه مرحله انجام می‌شود [15]. با حرکت کنترل شده با دقت بالا در یکی از آینه‌ها در تداخلگر، می‌توان مقادیر فاز را در هر پیکسل محاسبه نمود. بدین ترتیب تصاویری با اختلاف فاز معین تشکیل می‌شوند. اگر سه تصویر با اختلاف فاز $2\pi/3$ تولید شود فاز نهایی از معادله (8) محاسبه می‌شود [15]:

$$\emptyset = \tan^{-1}(\sqrt{3}\,\frac{I_3 - I_1}{2I_2 - I_1 - I_3}) \qquad (8)$$

این تصویر، تصویر فاز پیچیده نامیده می‌شود و برای محاسبه کمّی جابجایی سطح و تشخیص ترک به کار می‌رود.

یکی دیگر از روش‌های کاهش نویز تصاویر و افزایش کیفیت تصویر برشنگاری، استفاده از فیلتراسیون نرم‌افزاری است. انواع روش‌های فیلتراسیون شامل فیلترهای پایین گذر، بالاگذر، گوسی و میانه و همچنین ترکیبی از آن‌ها در افزایش کیفیت هاله‌ها به‌کار برده می‌شود.

آزمایش برای تمامی ترک‌ها با اندازه برش و بارگذاری عنوان شده در جدول 2 طی 247 مرحله انجام شد و قابلیت تشخیص هر ترک در تمامی مراحل، مورد مطالعه قرار گرفت. شکل 7 الگوی هاله‌ای ترک 10 میلی‌متری شناسایی شده با اندازه برش 10 میلی‌متر و بار اعمالی 147 نیوتن را نشان می‌دهد. برای بهبود تصویر و حذف نویز از فیلتر مکانی میانه[1] و فیلتر پایین گذر با ابعاد ماتریس 3 × 3 استفاده شده است. فیلتر بالا گذر نیز برای افزایش وضوح تصویر و بهبود جزئیات و الگوریتم سابل[2] برای افزایش وضوح لبه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. "شکل 8" تصویر بهبود یافته "شکل 7" را نشان می‌دهد. بهترین تصویر برای مطالعه ویژگی‌های ترک نقشه فاز[3] است. البته تا جایی که تصویر اولیه یا فیلتر شده، کیفیت مناسب را داشته باشد و بتوان اطلاعات مربوط به ترک را از آن استخراج کرد، سعی می‌شود برای کاهش زمان از محاسبه نقشه فاز صرف نظر گردد. "شکل 9" نقشه فاز استخراج شده برای الگوی هاله‌ای "شکل 7" را نشان می‌دهد که شامل اطلاعات کمّی

جدول 2 لیست اندازه و زاویه ترک، اندازه برش و بارگذاری مورد استفاده در آزمایش

Table 2 Crack size, angle, shear size and loading list of the experiments

اندازه ترک (mm)	زاویه ترک (deg)	اندازه برش (mm)	بارگذاری اعمالی (N)
5	90	10,8,5	147، 294، 441، 588، 735، 980
7.5	90	10,8,5	147، 294، 441، 588، 735
10	90	13,10,8,5,3	147، 294، 441، 588، 735، 980
15	90	13,10,8,5,3	147، 294، 441، 588، 735، 980
20	90	10,8,5	59، 88، 147، 294، 441، 588، 735
15	75	13,10,8,5	147، 294، 441، 588، 735، 980
15	60	13,10,8,5	147، 294، 441، 588، 735، 980
15	45	13,10,8,5	147، 294، 441، 588، 735، 980
15	30	13,10,8,5	147، 294، 441، 588، 735، 980
15	15	13,10,8,5	147، 294، 441، 588، 735، 980
15	0	13,10,8,5	147، 294، 441، 588، 735، 980

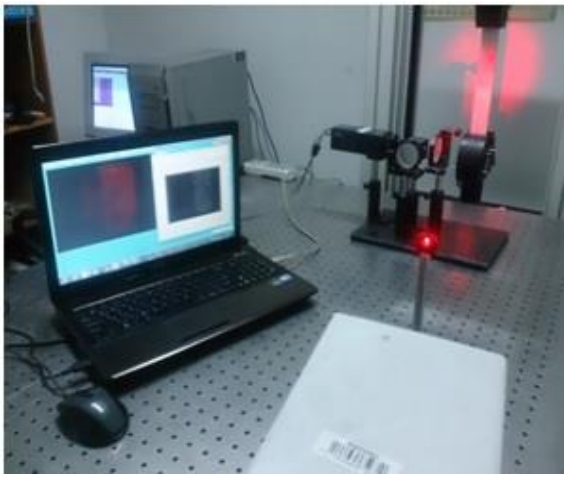


Fig. 6 Optical set-up used in the experiments

شکل 6 چیدمان تجهیزات نوری مورد استفاده در آزمایش

[1] Median filter
[2] Sobel Operator
[3] Phase map

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.9.39.5]

مشتقات جابجایی با جزئیات کامل است. از نقشه فاز در مواردی‌که هدف اندازه‌گیری مقدار دقیق تغییرشکل در منطقه عیب باشد می‌توان استفاده نمود. با افزایش میزان بارگذاری در نمونه‌ها، توزیع جابجایی در آن‌ها تغییر کرده و گرادیان جابجایی شدیدتر می‌شود.

بنابراین با شرایط ثابت، تعداد هاله‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد هاله‌ها تشخیص پذیری عیوب تاحدی ساده‌تر می‌شود. اما با افزایش بیش از حد بارگذاری، تعداد هاله بسیار زیاد شده، در هم فرورفته و محو می‌شوند. بنابراین برای هر ترک، یک میزان بارگذاری بهینه وجود خواهد داشت که تشخیص پذیری ترک در آن میزان بار ساده‌تر می‌باشد.

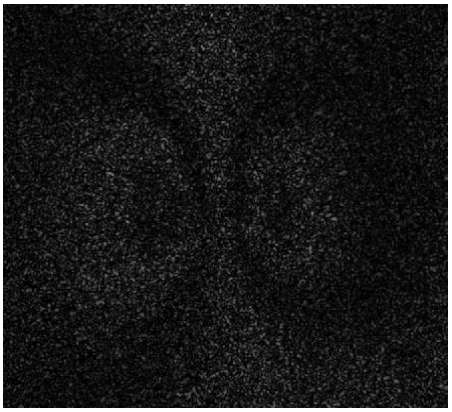


Fig. 7 Crack revealed with 10mm shear size and the load of 147 N

شکل 7 ترک شناسایی شده با اندازه برش 10 میلی‌متر و بار اعمالی 147 نیوتن

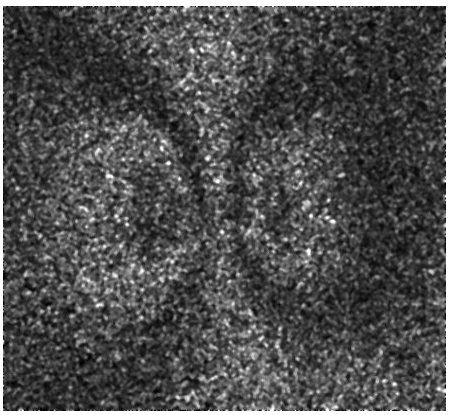


Fig. 8 Improved image with noise eliminating program

شکل 8 تصویر بهبود یافته با حذف نرم افزاری نویزها

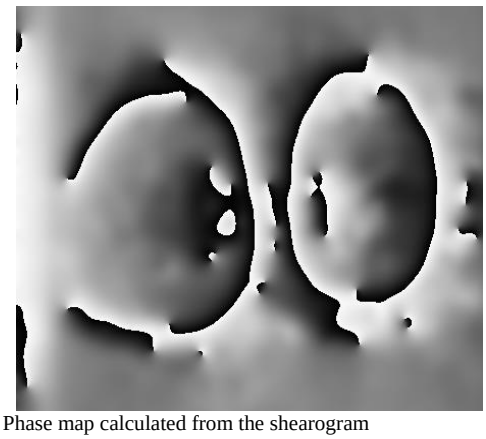


Fig. 9 Phase map calculated from the shearogram

شکل 9 نقشه فاز محاسبه شده از تصویر برشنگاری

در مورد اندازه برش نیز شرایط به همین ترتیب می‌باشد. در بار ثابت، مشتق جابجایی $\partial w/\partial x$ ثابت است. با افزایش اندازه برش δx براساس معادله (7) مخرج کسر طرف راست معادله افزایش می‌یابد. برای برقراری تساوی، اختلاف فاز Δ_x نیز می‌بایست افزایش یابد. بنابراین تعداد هاله‌ها نیز افزایش خواهد یافت. از این رو اندازه برش نیز یکی از پارامترهای تأثیر گذار در تعداد هاله‌ها و در نتیجه تشخیص پذیری عیوب خواهد بود.

"شکل 10" نتایج حاصل از آزمایش را روی ترک با طول 15 میلی‌متر تحت بارگذاری‌های متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش مقدار بارگذاری، تعداد هاله‌ها افزایش و وضوح هاله‌ها کاهش می‌یابد. در این حالت به نظر می‌رسد که در بار 441 نیوتن بهترین توزیع هاله‌ها برای تشخیص پذیر بودن عیوب بوجود می‌آید.

4-1- تعیین تشخیص پذیری ترک با اندازه‌های مختلف

نمونه‌ها در بارگذاری‌های مختلف و با استفاده از اندازه برش‌های متفاوت تحت آزمون عیب‌یابی قرار گرفتند. مطابق انتظار برای هر ترک با طول و زاویه مشخص، می‌توان محدوده‌ای از مقدار بار و اندازه برش که بهترین هاله‌ها را نتیجه می‌دهد، مشخص نمود.

در حالت کلی برای ارزیابی محدوده بارگذاری، می‌بایست قطعه را تحت بار گذاری افزایشی قرار داده و در هر میزان بار اعمالی، تصویر تداخلی تهیه و مورد بررسی قرار داد. بدین ترتیب قابلیت تشخیص ترک با اندازه بار مختلف وجود خواهد داشت. برای هر قطعه بسته به ابعاد و جنس آن بایستی این آزمایشات تکرار شود و از طرفی در هر نمونه، هر اندازه ترک با هر اندازه برشی، بارگذاری منحصر به فردی خواهد داشت.

انجام این روند بسیار زمان بر و طولانی خواهد بود. بنابراین تعیین معیاری که با استفاده از آن بتوان محدوده مناسب میزان بار و اندازه برش را تشخیص داد، بسیار مفید و کاربردی خواهد بود. در این تحقیق، برای هر اندازه برش کمترین و بیشترین میزان بار اعمالی برای تشخیص پذیری عیوب در نمونه‌های مورد بررسی تعیین شده است.

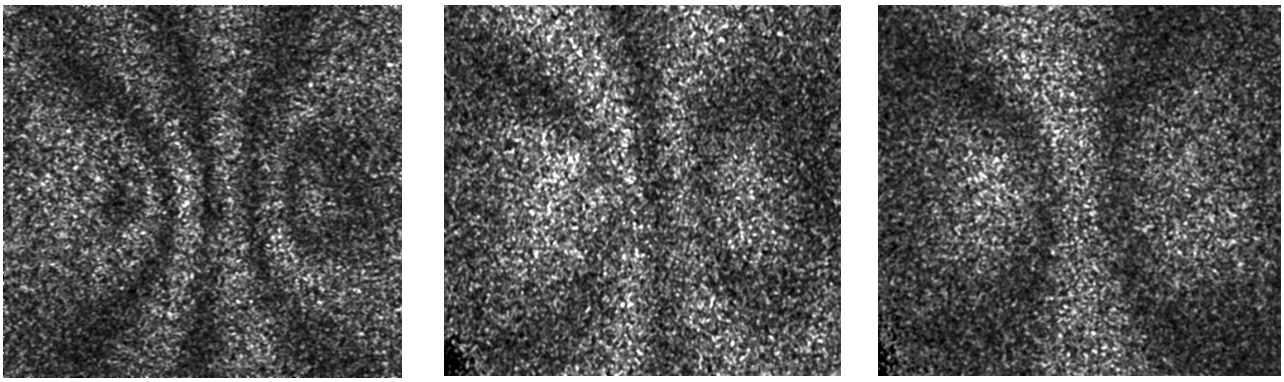
مقادیر مابین حد بالا و حد پایین، بارهای مجاز و خارج از این محدوده بارهای غیرمجاز هستند. نتایج حاصل از آزمایشات برای اندازه برش 5، 8 و 10 میلی‌متر به ترتیب در نمودارهای "شکل 11، 12 و 13" نشان داده شده است. در این نمودارها محدوده مجاز بارگذاری برای تشخیص‌پذیری هر ترک قابل تعیین است. به منظور مستقل کردن نمودارها از ابعاد هندسی نمونه، به جای اندازه بار، تنش میانگین در مقطع قطعات در محور افقی نشان داده شده است. به عنوان مثال ترک‌هایی با اندازه تقریبی 15 میلی‌متر در اندازه برش 10 میلی‌متر (نمودار شکل 13) با اعمال تنش 486 تا 1863 پاسکال، قابل تشخیص است.

تقریبا در تمامی نمودارها با افزایش طول ترک حدود بالا و پایین بار مجاز کاهش می‌یابد و برای ترک‌های بزرگتر، بار اعمالی باید خیلی کوچک شود. با برون‌یابی نمودارها می‌توان گفت که روش برشنگاری برای تشخیص عیوب بسیار کوچک و بسیار بزرگ مناسب نمی‌باشد. دلیل این موضوع، گرادیان جابجایی بسیار کم در ترک‌های بسیار کوچک است که تعداد و اندازه هاله‌ها را کاهش می‌دهد و تشخیص این هاله‌ها در زمینه لکه‌ای تصویر دشوار خواهد بود. از طرفی برای ترک‌های بسیار بزرگ نیز تعداد هاله‌های ایجاد شده زیاد و در نتیجه تفکیک آن‌ها در زمینه امکان‌پذیر نیست.

مشاهده می‌گردد که در تمامی نمودارها محدوده مجاز برای تشخیص ترک در هنگامی که اندازه برش با اندازه ترک برابر باشد بسیار گستره است و

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.9.39.5]



(c) (b) (a)

Fig. 10 Shearography test results of the 15mm crack length with the test loading of (a)294 N (b)411 N and (c)588 N

شکل 10 نتایج حاصل از برشنگاری قطعه دارای ترک 15 میلی‌متری تحت نیروی (a) 294 ، (b) 411 و (c) 588 نیوتن

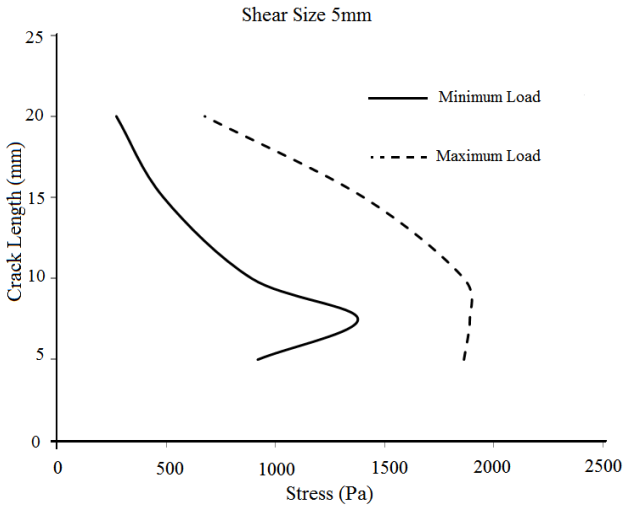


Fig. 11 Crack detection area with the shearing size of 5 mm

شکل 11 محدوده ترک قابل تشخیص در اندازه برش 5 میلی‌متر

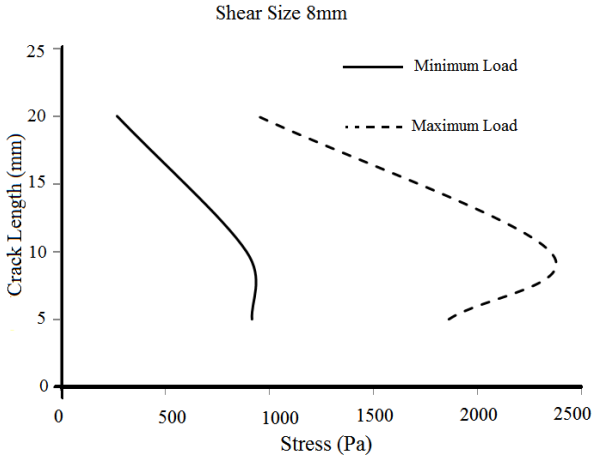


Fig. 12 Crack detection area with the shearing size of 8mm

شکل 12 محدوده ترک قابل تشخیص در اندازه برش 8 میلی‌متر

در نتیجه تشخیص‌پذیری در این محدوده ساده‌تر خواهد بود. از طرفی در تمامی موارد اندازه برش 10 میلی‌متر، حوزه گسترده‌تری را برای تشخیص عیوب پیش‌بینی می‌کند. از این‌رو پیش‌بینی می‌گردد بهینه ترین اندازه برش برای تشخیص‌پذیر بودن ترکها در هر نمونه، در حد اندازه ترک‌های احتمالی است. از طرفی درصورت عدم اطلاع از اندازه احتمالی ترک‌ها در قطعه، با تنظیم اندازه برش به میزان 10 میلی‌متر، بهترین نتایج حاصل گردد.

نکته قابل توجه دیگری که از نمودارها نتیجه می‌شود، قابلیت تشخیص تقریباً تمامی ترک‌ها در بارگذاری 950 نیوتن است.

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد شکل منحنی‌های بارگذاری در نمودارها بعضاً با هم متفاوت است. دلیل این امر را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود. هنگامیکی بارگذاری برای شناسایی عیوب انجام می‌گیرد، درابتدا همراه با افزایش تدریجی بار و به محض مشاهده هاله های اولیه، حداقل بار برای تشخیص‌پذیری عیوب تعیین می‌گردد. از آنجا که براساس معادله 7 تعداد هاله‌های تشکیل شده وابسته به گرادیان جابجایی و اندازه برش است، در یک اندازه برش ثابت، پارامتر تأثیرگذار گرادیان جابجایی یعنی $\partial w/\partial x$ تعیین کننده است. برای اندازه ترک‌های مختلف این اندازه ارتباط مستقیمی با بارگذاری دارد اما این ارتباط کاملاً خطی نیست. از این رو در نمودارهای مختلف، منحنی‌های متفاوتی برای حداقل اندازه بارگذاری مشاهده می‌گردد. با ادامه بارگذاری، تعداد هاله‌ها افزایش می‌یابد تا جاییکه در بارگذاری بیشینه با افزایش بیش از اندازه و تداخل هاله‌ها، تشخیص عیوب دیگر میسر نخواهد بود. این امر نیز کاملاً به شرایط افزایش گرادیان جابجایی سطحی (شیب)

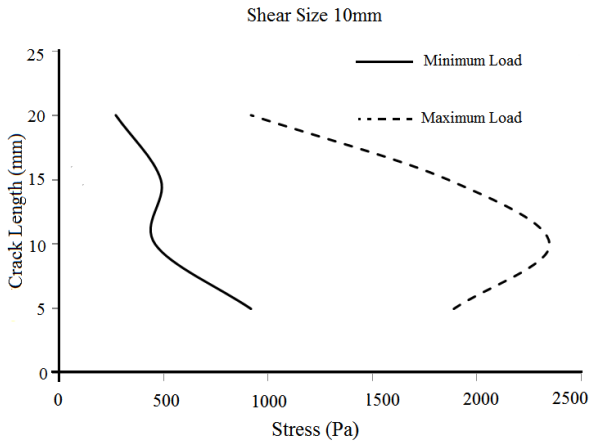


Fig. 13 Crack detection area with the shearing size of 10mm

شکل 13 محدوده ترک قابل تشخیص در اندازه برش 10 میلی‌متر

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.9.39.5]

بستگی داشته و وابستگی غیرخطی موجب تفاوت در شکل منحنی‌های مختلف در نمودارها می‌گردد.

به‌دلیل حساسیت و بعضاً دشواری شناسایی هاله‌ها در بار حداقلی و همچنین بار حداکثری، آزمون عیب‌یابی در این بارها در برخی موارد (به خصوص در اندازه برش‌های کوچکتر) بارها و بارها انجام شد تا علاوه بر اطمینان از صحت تعیین بار، از تکرار پذیر بودن آزمون‌ها نیز اطمینان حاصل گردد. بعنوان مثال در اندازه برش 5mm آزمایش حدود پنج بار تکرار شد و با اطمینان از صحت تکرارپذیری عدد اندازه بار ثبت شد. در مورد بارگذاری‌های غیرحداقلی و غیرحداکثری به‌دلیل عدم حساسیت سیستم در این بارها و همچنین عدم وابستگی نتیجه کلی به تکرارپذیری در این محدوده، نیازی به تکرار زیاد آزمایشات برای تایید تکرارپذیر بودن نیست. در این بخش، انتخاب بهترین هاله‌ها مدنظر نبوده بلکه معیار تشخیص‌پذیری هاله‌ها از یک میزان حداقلی تا حداکثری است. در نمودارهای ارایه شده نیز این مطلب قابل مشاهده است که برای هر اندازه برش، یک گستره بارگذاری ارایه می‌گردد که در این گستره عیب قابل شناسایی است.

4-2- تعیین تشخیص ترک‌ها با زاویه مختلف

زاویه قرارگیری ترک نسبت به محور بارگذاری، از دیگر عوامل تاثیرگذار در نتایج آزمون عیب‌یابی است. ترک‌های با زاویه 90 درجه نسبت به راستای بار، کاملا تحت مود بارگذاری باز شوندگی قرار می‌گیرند که این موضوع باعث ایجاد گرادیان شدید جابجایی در اطراف ترک می‌گردد. هرچه زاویه ترک نسبت به راستای بارگذاری کمتر شود، مود بازشدگی کاهش یافته و توزیع جابجایی یکنواخت تر می‌شود. از این‌رو ناپیوستگی جابجایی کمتر و شناسایی ترک با استفاده از روش برشنگاری دشوارتر خواهد شد. از این‌رو، برای شناسایی ترک‌های مورب هم اندازه با ترک‌های 90 درجه، می‌بایست بار اعمالی را افزایش داد.

برای تشخیص میزان اثر زاویه، آزمایشات بر روی قطعات با ترک‌های 15 میلی‌متری در زاویه‌های صفر، 15، 30، 45، 60، 75 و 90 درجه با اندازه برش 10 میلی‌متر انجام گردید و در هر مورد، مناسب‌ترین بار برای تشخیص‌پذیری ترک مشخص شد. با ارزیابی آزمایشات، محدوده 25 درصدی اطراف این مقادیر، محدوده مجاز برای بارگذاری محسوب می‌شود.

مطابق انتظار ترکی که دقیقا در راستای بارگذاری قرار دارد توسط آزمایش برشنگاری قابل تشخیص نمی‌باشد. "شکل 14" میزان تنش میانگین مجاز را برای تشخیص عیب در زاویه ترک‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش زاویه ترک نسبت به راستای بارگذاری، میزان بار موردنیاز افزایش می‌یابد.

برای تشخیص تمام عیوب می‌بایست جسم را از دو جهت عمود برهم تحت آزمایش قرار داد. به این ترتیب می‌توان اندازه بار را نیز برای ترک‌های با زاویه حدود 45 درجه در نظر گرفت. به این شکل دو معیار اساسی برای تعیین بارگذاری یعنی اندازه و جهت گیری ترک همزمان رعایت می‌گردند. در نمونه‌های با ترک 15 میلی‌متر، اندازه بار براساس زاویه 45 درجه، محدوده 700 تا 1150 پاسکال است (شکل 14). این میزان بارگذاری براساس شکل 13، محدوده مناسبی برای تشخیص عمده ترک‌ها در نمونه خواهد بود.

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله قابلیت روش داخل‌سنجی لیزری برای تعیین ترک‌های زیر سطحی با موقعیت‌های مختلف در ماده مرکب زمینه پلیمری مورد مطالعه

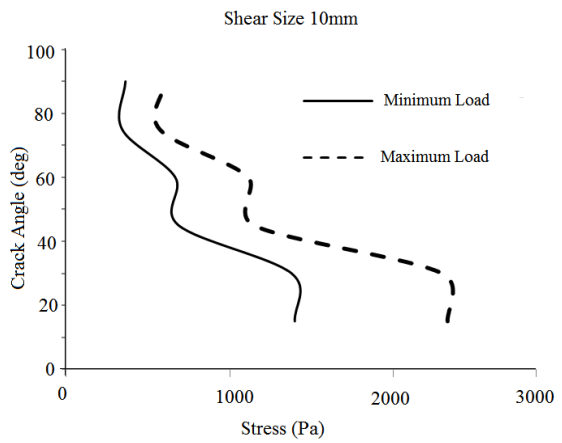


Fig. 14 Crack detection area for different crack angels

شکل 14 محدوده قابل تشخیص ترک‌ها در زاویه‌های مختلف

قرار گرفته است. قابلیت‌های روش تداخل‌سنجی لیزری باعث شده است که بتوان از این روش به‌طور گسترده در بازرسی‌های غیرمخرب صنعتی مخصوصا برای مواد پلیمری و کامپوزیتی استفاده نمود.

میزان بارگذاری از عوامل مهم در این روش آزمون است. اعمال بار کششی بسیار کم موجب جابجایی‌های کوچک در اطراف ترک می‌شود و شناسایی ترک را با استفاده از این روش مشکل می‌کند. بار کششی بسیار زیادهاله های بسیار زیادی ایجاد می‌کند که تداخل این هاله‌ها نیز شناسایی ترک را با مشکل روبرو می‌کند. در مقاله تاثیر بارگذاری کششی بر شناسایی عیوب مورد مطالعه قرار گرفته است و محدوده بار کششی مجاز در اندازه برش‌های مختلف تعیین شده است. سپس تاثیر اندازه برش و زاویه قرارگیری ترک مورد مطالعه قرار گرفته است. براساس نتایج آزمایشات، بهترین نتایج زمانی حاصل می‌گردد که اندازه برش با طول ترک‌ها در قطعه برابر باشند. از طرفی در کلیه موارد، اندازه برش 10 میلی‌متر نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. از طرفی با بررسی ترک‌های مورب نتیجه شد که هرچه زاویه ترک با راستای اعمال نیرو کاهش یابد، نیروی لازم برای تشخیص ترک افزایش می‌یابد و با اعمال نیروی کششی بر قطعه، ترک‌های هم راستای با کشش قابل شناسایی نمی‌باشند. بنابراین در کاربردهای صنعتی بهتر است قطعه از دو طرف تحت بارگذاری قرار گرفته و اندازه بار نیز براساس زاویه 45 درجه تنظیم گردد. بدین ترتیب، با انجام بازرسی به روش تداخل‌سنجی، بیشتر ترک‌های موجود در جسم قابل شناسایی خواهند بود.

6- مراجع

[1] N. Xu, X. Xie, X. Chen, L. Yang, Shearography for specular object inspection, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 61, No. 1, pp. 14–18, 2014.

[2] D. Akbari, N. Soltani, M. Farahani, Numerical and experimental investigation of defect detection in polymer materials by means of digital shearography with thermal loading, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 227, No. 3, pp. 430-442, 2013.

[3] J. Leendertz, J. Butters, An image sharing speckle pattern interferometer for measuring bending moments, *Journal of Physics E*, Vol. 6, No. 1, pp. 1017-1110, 1973.

[4] S. L. Toh, F. S. Chau, V. P. Shim, C. J. Tay, H. M. Shang, Application of sheagraphy in nondestructive testing of composite plates, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 23, No. 3, pp. 267-275, 1990.

[5] R. Kastle, E. Hack, U. Sennhauser, Multiwavelength shearography for quantitative measurements of two-dimensional strain distributions, *Applied Opics*, Vol. 38, No. 1, pp. 96–100, 1999.

[6] D. Findeis, J. Gryzagoridis, A comparison of the capabilities of portable shearography and portable electronic speckle pattern interferometry, *Proceeding of SPIE*, Vol. 5393, No. 43, pp. 41–49, 2004.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.9.39.5]

[7] R. Ruzek, R. Lohonka, J. Jironc, Ultrasonic C-Scan and shearography NDI techniques evaluation of impact defects identification, *NDT&E International*, Vol. 39, No. 2, pp. 132–142, 2006.

[8] Y. H. Huang, S. P. Ng, L. Liu, C. L. Li, Y. S. Chen, Y. Y. Hung, NDT&E using shearography with impulsive thermal stressing and clustering phase extraction, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 47, No. 7, pp. 774–781, 2009.

[9] D. Akbari, N. Soltani, Investigation of loading parameters in detection of internal cracks of composite material with digital shearography, *World Applied Sciences Journal*, Vol. 21, No. 4, pp. 526–535, 2013.

[10] G. DeAngelis, M. Meo, D. P. Almond, S. G. Pickering, S. L. Angioni, A new technique to detect defect size and depth in composite structures using digital shearography and unconstrained optimization, *NDT&E International*, Vol. 45, No. 1, pp. 91–96, 2012.

[11] H. Lopes, F. Ferreira, J. V. Araújo, P. Moreno-García, Localization of damage with speckle shearography and higher order spatial derivatives, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 49, No. 1, pp. 24–38, 2014.

[12] L. Pieczonka, F. Aymerich, W. J. Staszewski, Impact damage detection in light composite sandwich panels, *Procedia Engineering*, Vol. 88, No. 1, pp. 216 – 221, 2014.

[13] D. Akbari, N. Soltani, F. Reshadi, Aplication of digital shearography for non destructive testing of materials with thermal loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 36-45, 2013. (in Persian فارسی)

[14] M. Mohamadi, D. Akbari, Evaluation of sub-surface cracks in polymer matrix composites with laser interferometric method, *International Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 11-23, 2015. (in Persian فارسی)

[15] D. Francis, *Surface Strain Measurement Using Pulsed Laser Shearography with Fibre-Optic Imaging Bundles*, PhD Thesis, Cranfield University, 2008.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.9.39.5]