



تحلیل اجزای محدود آزمون غیرمخرب دمانگاری ارتعاشی به کمک فرکانس تشدید عیب

سیدعلی قرشی¹، فرهنگ هنرور²، سیدمرتضی طباطبایی پور^{3*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- پژوهشگر پسا دکتری، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه استرثکلاید، گلاسگو، انگلستان

morteza.tabatabaeipour@strath.ac.uk

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 15 بهمن 1397 پذیرش: 28 فروردین 1398 ارائه در سایت: آذر 1398	دمانگاری ارتعاشی یک روش جدید آزمون غیرمخرب است که با استفاده از امواج فراصوتی به عنوان عامل تحریک، عیوب سطحی و یا زیرسطحی را به ارتعاش درآورده و موجب گرم شدن ناحیه عیب می‌شود. بدین ترتیب ناحیه عیب که گرمتر از سایر قسمت‌های قطعه است، به راحتی با روش دمانگاری شناسایی می‌شود. سایش لبه‌های عیب بر روی یکدیگر، رفتار ویسکوالاستیک ناحیه عیب و ارتعاشات غیرخطی در ناحیه عیب از عوامل مهم ایجاد گرادیان دمایی در محل عیب محسوب می‌شوند. گرادیان دمایی ایجاد شده، توسط یک دوربین فروسرخ قابل شناسایی است. در این مقاله در بخش اول، از یک مدل اجزای محدود جهت شبیه‌سازی پدیده دمانگاری ارتعاشی استفاده می‌شود. مدل مورد نظر بر روی یک ورق آلومینیومی با عیبی به شکل یک سوراخ کف تخت طراحی می‌شود. فرکانس تشدید عیب به کمک روابط تئوری ارتعاشات و حل اجزای محدود به همراه الگوریتم مبتنی بر تحلیل فرکانسی مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج بدست آمده از این دو روش با نتیجه حاصل از روش تحلیل فرکانس اصلی مقایسه می‌شود. علاوه بر این در قسمت دوم مقاله، یک موج سینوسی با دامنه مدوله شده شامل فرکانس تشدید عیب (فرکانس سیگنال حامل) و فرکانس مرتبط با طول نفوذ حرارتی (فرکانس سیگنال پیام)، در مدت زمان معین به قطعه اعمال می‌شود. تصاویر دامنه و فاز حرارتی با استفاده از امواج حرارتی متاثر از گرادیان دمایی ایجاد شده در قطعه به کمک الگوریتم چهار نقطه، به منظور شناسایی و اندازه‌گیری مکان، اندازه و هندسه عیب تشکیل می‌شود.
کلیدواژه‌گان: امواج فراصوتی دمانگاری فرکانس تشدید عیب پردازش تصویر الگوریتم چهار نقطه	

Finite element analysis of vibro-thermography nondestructive testing technique via local defect resonance

Seyed Ali Ghorashi¹, Farhang Honarvar¹, Seyed Morteza Tabatabaeipour^{2*}

1- Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Strathclyde, Glasgow G11XW, UK

morteza.tabatabaeipour@strath.ac.uk

Article Information

Original Research Paper
Received 4 February 2019
Accepted 17 April 2019
Available November 2019

Keywords:

Ultrasonic waves
Thermography
Defect resonance
Thermal image processing
Four-point algorithm

Abstract

Vibro-thermography is an emerging and promising technique that uses ultrasonic elastic waves as an excitation source to detect and evaluate surface and subsurface defects. Friction of the edges of defects, viscoelastic behavior and non-linear vibrations of the defect region are the main sources of heating and the temperature gradient that shows up synchronously with variations of non-linear elastic energy. The temperature gradient in the defect region can be imaged by an infrared camera in order to estimate the location and size of the defects. In this paper, the vibro-thermography is simulated in COMSOL Multiphysics software. Lamb waves are used to excite an aluminum plate containing a flat-bottomed hole. First, the resonance frequency of the defect is found by means of the theory of vibrations and also by finite element method (FEM). An algorithm that incorporates frequency analysis as a function of out-of-plane displacements is used to verify this frequency and the results are compared with the eigenfrequency analysis results. The agreement observed between the theoretical and numerical models is found to be very good. The plate is then excited by an amplitude modulated sine-burst at the local defect resonance (LDR) frequency and a frequency related to the thermal penetration depth. Thermal image processing is carried out on the thermal waves to obtain their amplitude and phase images. By considering a four-point algorithm, the location, size and geometry of the defect is estimated with good accuracy.

1- مقدمه

دمانگاری² هستند. روش دمانگاری ارتعاشی³ نیز یک تکنیک غیرمخرب ترکیبی است که با ادغام دو روش فراصوتی و

روش‌های مختلفی برای ارزیابی غیرمخرب مواد وجود دارد. دو روش شناخته شده ارزیابی غیرمخرب، روش‌های فراصوتی¹ و

² Thermography³ Vibro-thermography¹ Ultrasonic

Please cite this article using:

S. A. Ghorashi, F. Honarvar, S. M. Tabatabaeipour, Finite element analysis of vibro-thermography nondestructive testing technique via local defect resonance, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 7, pp. 24-33, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ترک و گرمای ایجاد شده، مطالعه و بررسی کردند. موربیدینی و کاولی، یک رابطه خطی بین مقدار گرمای ایجاد شده در محدوده ترک با ضریب اصطکاک و مد فرکانس تحریک پس از انجام آزمون دمانگاری ارتعاشی بر روی یک قطعه فولادی، ارائه کردند [14].

طباطبایی‌پور و همکاران، به صورت تجربی فرکانس تشدید عیب در یک قطعه با عیب سوراخ کف تخت¹ را بررسی و معادله‌ای تئوری برای تخمین فرکانس تشدید عیب ارائه کردند [15].

کوبین و همکاران، با استفاده از الگوریتم فرسوخ مدوله شده² و با تحریک پالسی، برای یک قطعه فولادی شامل عیب سوراخ کف تخت مستطیلی، از روش دمانگاری ارتعاشی استفاده کردند و نتایج خود را با حل عددی از نرم‌افزار آباکوس مقایسه کردند [16].

گلیتر و همکاران، اجرای آزمون دمانگاری ارتعاشی همراه با ارسال موج با مدولاسیون دامنه را برای یک سری عیوب انتخابی مانند لایه‌لایه‌شدگی³ و جدایش در مواد مرکب، مطالعه کردند [17].

بررسی مقالات نشان می‌دهد که هرچند تحقیقات تجربی متعددی در این زمینه انجام شده است، ولی توجه کمتری به فهم دقیق فرایند دمانگاری ارتعاشی (به طور خاص با فرکانس تشدید عیب) صورت گرفته است. بنابراین در این مقاله برای اولین بار فرایند کامل دمانگاری ارتعاشی با فرکانس تشدید عیب به طور کامل شبیه‌سازی می‌شود. در ابتدا مدل با عیب مورد نظر در نرم‌افزار اجزای محدود COMSOL Multiphysics طراحی می‌شود. سپس فرکانس تشدید عیب⁴، فرکانسی که بیشترین تاثیر در افزایش دامنه در ناحیه عیب را دارد، از لحاظ تئوری و شبیه سازی (در حوزه زمان) و تحلیل فرکانس‌های اصلی بررسی و برای مدل عیب طراحی شده محاسبه می‌شود. در این مرحله، فرکانس‌های تشدید عیب حاصل از تئوری و شبیه‌سازی با فرکانس تشدید عیب حاصل از تحلیل فرکانس‌های اصلی مقایسه می‌شود. در مرحله نهایی، گرادیان دمایی ایجاد شده در ناحیه عیب، حاصل از ارسال یک موج سینوسی با فرکانس تشدید عیب، ارزیابی می‌گردد. در این مرحله، الگوی دمایی منطقه عیب با استفاده از الگوریتم چهارنقطه⁵ به منظور شناسایی و اندازه‌گیری عیب نمایش داده می‌شود.

دمانگاری ایجاد شده است. از روش دمانگاری ارتعاشی به منظور یافتن عیوب سطحی متاثر از فرآیند خستگی مانند عیوب غیرخطی، لایه لایه شدگی در کامپوزیت‌ها و ترک‌های سطحی در قطعات صنعتی با هندسه‌های گوناگون، استفاده شده است [1]. از جمله مزایای دمانگاری ارتعاشی قابلیت استفاده از این روش بر روی قطعات با اشکال هندسی مختلف، عدم وابستگی به مکان قرارگیری تراگذار فراصوتی، تشخیص عیوب غیرخطی سطحی و زیرسطحی و انجام آسان آزمایش است [2-4]. همچنین، با استفاده از این روش، ابعاد و موقعیت عیب به طور نسبتاً دقیقی قابل تشخیص است [5].

در سال 1980، اسنایدر و همکاران اولین مباحث پایه‌ای مرتبط با دمانگاری ارتعاشی را مطرح کردند [6]. پرواسی و همکاران بصورت تجربی به انجام دمانگاری ارتعاشی جهت تشخیص ترک‌های سطحی پرداختند و نتایج خود را با مدل اجزای محدود مقایسه کردند [7]. ریزی و همکاران، به بررسی ترک در یک قطعه و عوامل مؤثر بر ایجاد حرارت پرداختند. آن‌ها به عوامل ویسکوالاستیک و سایش لبه‌های ترک برای ایجاد حرارت در ناحیه عیب اشاره کردند [8].

پیاو و همکاران، برای تشخیص میکروتُرک‌ها در قطعه‌ای که با روش پلازما پوشش حرارتی داده شده است، از روش آزمون دمانگاری ارتعاشی استفاده کردند [9]. در یک مطالعه دیگر که بصورت تجربی و عددی انجام گرفته است، مبروکی و همکاران، از روش آزمون دمانگاری ارتعاشی برای تشخیص ترک‌های ایجاد شده ناشی از خستگی، استفاده کرده‌اند. آن‌ها، همچنین، در مطالعه عددی به بررسی اثر اصطکاک کولمب در ایجاد گرما در محل عیب پرداخته و مدل خود را با روش تجربی تطبیق داده‌اند [10، 11].

اگرچه تغییر شکل پلاستیک در ارزیابی غیرمخرب مطلوب نیست، رنشا و همکاران، پس از اجرای آزمایش‌های تجربی، به سه عامل تغییر شکل پلاستیک، اصطکاک یا سایش در محل عیب و اثر ویسکوالاستیک به عنوان عوامل مؤثر در ایجاد تغییر دما در محل عیب اشاره کرده‌اند [2].

در طی سال‌های 2008 تا 2011 هالند و همکاران، تحقیقات مختلفی در زمینه آزمون دمانگاری ارتعاشی انجام دادند [12]. اثر فرکانس تحریک بر حساسیت آزمون دمانگاری ارتعاشی، توسط هالند و همکاران بررسی شد. آن‌ها به وجود رابطه‌ای مستقیم بین فرکانس تحریک و افزایش دما در محل ترک‌ها اشاره کردند. همچنین، آن‌ها روش‌های متعددی را برای شناسایی ترک در قطعات فلزی، از جمله روشی مبتنی بر اندازه

¹ Flat-bottomed hole (FBH)

² Lock-in infrared thermography algorithm

³ Delamination

⁴ Local defect resonance (LDR)

⁵ Four-point algorithm

جدول 1 اطلاعات مکانیکی و حرارتی قطعه آلومینیومی مدل شده در تحلیل اجزاء محدود

نوع پارامتر	توضیح	مقدار پارامتر
E (GPa)	مدول الاستیسیته	70
ν	ضریب پواسون	0/33
ρ ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	چگالی	2780
η	ضریب اتلاف ماده	0/02
R (m)	شعاع عیب	0/01
d (m)	ضخامت باقی مانده	0/001
L (m)	ضخامت ورق	0/003
k ($\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$)	ضریب انتقال حرارت هدایت	121
C_p ($\frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$)	گرمای ویژه	875
T_0 ($^\circ\text{C}$)	دمای اولیه قطعه	20
ϵ	ضریب گسیل	0/02

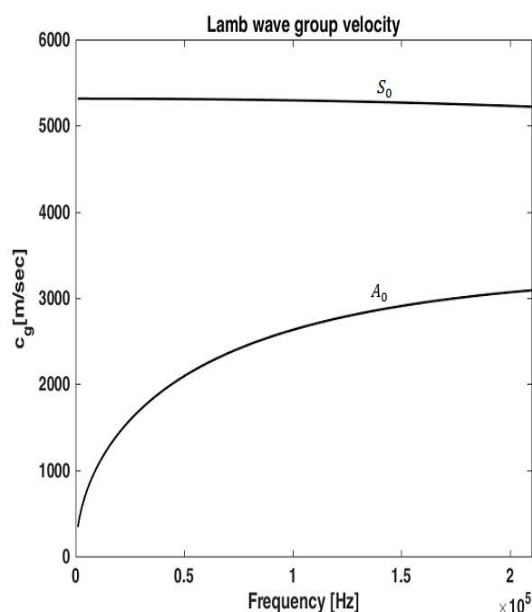


Fig. 2 Group velocity dispersion curve of the simulated aluminum plate
شکل 2 نمودار پراکندگی سرعت گروه موج لب در ورق آلومینیوم شبیه سازی شده

3- فرکانس تشدید عیب

3-1- محاسبه تئوری فرکانس تشدید عیب

افزایش دامنه نوسانات (در محدوده الاستیک) در محل عیب یکی از راه های استفاده مؤثر از روش دمانگاری ارتعاشی است. برای افزایش کرنش الاستیک در محل عیب می توان از یک منبع تحریک با توان آکوستیکی بالا استفاده کرد که همیشه در دسترس یا مقرون به صرفه نیست.

2- مدل اجزای محدود انتشار موج لب

برای مدل سازی قطعه از نرم افزار COMSOL Multiphysics استفاده شده است. شکل 1، یک قطعه آلومینیومی با ابعاد مشخص $150 \times 40 \times 3 \text{ mm}^3$ که در آن موقعیت یک عیب به صورت سوراخ کف تخت و محل قرارگیری تراگذار فراصوتی معین شده است را نشان می دهد. این قطعه به صورت سه بعدی در نرم افزار مورد نظر مدلسازی شده است. سوراخ کف تخت دارای قطر 20 mm و ضخامت باقیمانده 1 mm است. مرکز عیب دایره ای شکل در موقعیت $x=20\text{mm}$ و $y=125\text{mm}$ قرار دارد. سایر مشخصات مکانیکی و حرارتی مدل ایجاد شده در جدول 1 آورده شده است.

برای تعیین فرکانس تشدید عیب، یک سیگنال چیرپ¹ که شامل طیف فرکانسی (1 تا 200 کیلوهرتز) است در مدت زمان 0/004 ثانیه برای ایجاد امواج لب به قطعه ارسال می شود. تعیین اندازه مناسب المان ها با توجه به طیف فرکانسی امواج لب موجود، با استفاده از نرم افزار GUIGUW [18] انجام شده است که این مقدار با توجه به سرعت موج و طول موج امواج لب موجود تعیین می شود. با توجه به شکل 2، در فرکانس 200 کیلوهرتز، حداکثر سرعت موج لب موجود، مد S_0 ، $\frac{m}{s} 5274$ و حداقل طول موج بر اساس شکل 3، 0/01018 متر است. المان مش انتخاب شده از نوع چهار وجهی است و اندازه مناسب المان ها جهت ایجاد امواج فراصوت، $\frac{1}{8}$ برابر حداقل طول موج یعنی 1/2 میلی متر و گام زمانی تحلیل 0/1 میکروثانیه در نظر گرفته شد [19].

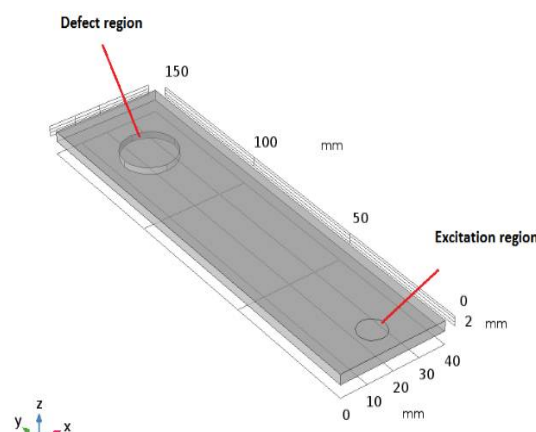


Fig. 1 Geometry of the simulated aluminum part showing the FBH defect and the excitation regions

شکل 1 هندسه قطعه آلومینیومی مدل شده که منطقه عیب و محل تراگذار فراصوتی در آن نشان داده شده است.

¹ Chirp

در رابطه (3)، E مدول الاستیسیته، ν ضریب پواسون و d ضخامت باقی مانده در محل عیب است. همچنین جرم مؤثر از روابط (4) و (5) بدست می آید.

$$m_{eff} = 1.8 m \quad (4)$$

$$m = \rho \pi d R^2 \quad (5)$$

که در این معادله m جرم باقی مانده در انتهای عیب و ρ چگالی ماده است.

با جایگذاری معادله های (2) و (4) در معادله (1)، فرکانس تشدید عیب در یک قطعه دارای عیبی به شکل یک سوراخ کف تخت دایره ای، به صورت رابطه (6) ارائه می شود [15، 20، 21]:

$$f_{LDR} \approx \frac{1.6d}{R^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad (6)$$

باتوجه به معادله (6)، فرکانس تشدید عیب مستقل از محل تحریک موج و طول و عرض هندسی قطعه است.

کرنش در محل عیب در یک لحظه مشخص در مختصات استوانه ای، به صورت رابطه (7) است [21]:

$$\varepsilon_r = \frac{8U_{LDR}d}{3R^2} \quad (7)$$

که در معادله (7)، U_{LDR} دامنه جابجایی خارج از صفحه³ در یک لحظه مشخص در محل عیب است.

با توجه به معادله (6) و مشخصات قطعه، که در جدول 1 آمده است، مقدار فرکانس تشدید عیب به صورت تئوری برابر با 24/55kHz بدست می آید.

3-2- تعیین فرکانس تشدید عیب در مدل اجزای محدود

پس از ارسال موج، سیگنال های جابجایی خارج از صفحه در $z=3$ mm در فواصل 1 mm نسبت به هم استخراج شده است. سپس این سیگنال ها که در حوزه زمان هستند، توسط نرم افزار متلب⁴ با استفاده از تبدیل فوریه⁵، در حوزه فرکانس پردازش می شوند:

$$U(x, y, f) = \mathcal{F}[u(x, y, t)] \quad (8)$$

که در آن \mathcal{F} تابع تبدیل فوریه است.

شکل 4، سیگنال های جابجایی خارج از صفحه سه نقطه مختلف از مناطق سالم و معیوب قطعه را نشان می دهد. همان طور که در شکل 4 نمایش داده شده است نقاط انتخاب شده از منطقه سالم، نقاط A و B، از دامنه نوسانی نسبتاً مشابهی برخوردار هستند اما نقطه انتخاب شده از منطقه

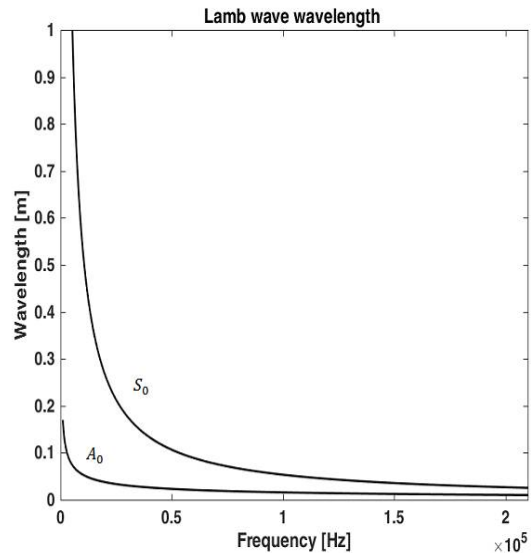


Fig. 3 The wavelength dispersion curve of the simulated aluminum plate

شکل 3 نمودار پراکندگی طول موج امواج لمب در ورق آلومینیوم شبیه سازی شده

یک راه مؤثر دیگر به جای استفاده از منبع تحریک با توان آکوستیکی بالا، استفاده از فرکانس تشدید عیب است. فرکانس تشدید عیب، فرکانسی است که در آن عیب با بیشترین دامنه (بیشترین انرژی) نسبت به نقاط مجاور خود ارتعاش می کند، بنابراین، تعیین فرکانس تشدید عیب و بهره گیری از آن در دمانگاری ارتعاشی لازم است.

فرکانس تشدید عیبی که به صورت یک سوراخ کف تخت در کف قطعه است را می توان به عنوان فرکانس طبیعی عیب در نظر گرفت که در آن عیب با یک سفتی مؤثر¹ و یک جرم مؤثر² در حال ارتعاش است. در این حالت، فرکانس تشدید عیب، f_{LDR} با استفاده از روابط تئوری ارتعاشات، به شکل رابطه (1) بیان می شود [20]:

$$f_{LDR} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eff}}{m_{eff}}} \quad (1)$$

که در آن k_{eff} سفتی مؤثر و m_{eff} جرم مؤثر هستند و برای عیب سوراخ کف تخت دایره ای در نظر گرفته شده، می توان رابطه (2) را نوشت:

$$k_{eff} = \frac{198\pi D}{R^2} \quad (2)$$

که در این معادله R شعاع عیب و D سفتی خمشی می باشد که از رابطه (3) بدست می آید.

$$D = \frac{E d^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3)$$

³ Out-of-plane displacement

⁴ MATLAB

⁵ Fast Fourier Transform (FFT)

¹ Effective stiffness

² Effective mass

کیلوهرتز بدست می‌آید.

همچنین از طریق بخش تحلیل فرکانس‌های اصلی¹ نرم‌افزار COMSOL Multiphysics، طبق شکل 6، فرکانس تشدید عیب 24/75 کیلوهرتز بدست آمد.

جدول 2، مقادیر فرکانس تشدید عیب محاسبه شده با استفاده از روش‌های تئوری ($f_{LDR,1}$) و الگوریتم مرتبط با جابجایی در راستای خارج از صفحه ($f_{LDR,2}$) با روش تحلیل فرکانس‌های اصلی ($f_{LDR,eigenfrequency}$)، به همراه خطای نسبی محاسبه شده با استفاده از معادله (10)، را نشان می‌دهد:

$$error = \frac{|f_{LDR,i} - f_{LDR,eigenfrequency}|}{f_{LDR,eigenfrequency}}, \quad (10)$$

$i = 1, 2.$

جدول 2 مقایسه مقادیر فرکانس تشدید عیب محاسبه شده از معادلات تئوری ($f_{LDR,1}$) و الگوریتم تحلیل فرکانس به عنوان تابعی از جابجایی خارج صفحه ($f_{LDR,2}$) با روش تحلیل فرکانس‌های اصلی.

Table 2 Comparison of LDR frequency obtained from theoretical equations ($f_{LDR,1}$) and the algorithm of frequency analysis as a function of out-of-plane displacements ($f_{LDR,2}$) with eigenfrequency analysis.

روش محاسبه	فرکانس تشدید عیب (kHz)	خطای نسبی %
$f_{LDR,1}$	24/55	0/8
$f_{LDR,2}$	25/25	2

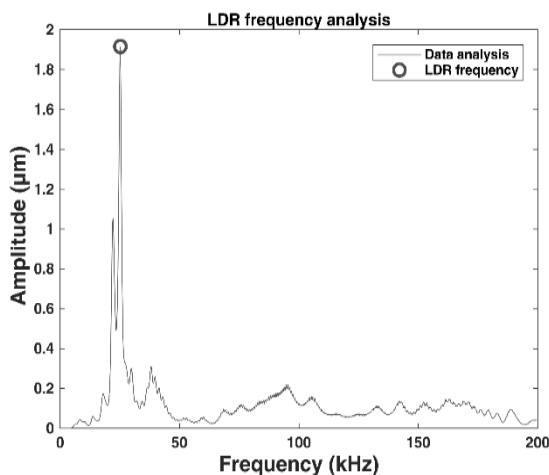


Fig. 5 Amplitude analysis of the out-of-plane component of the displacement signals as a function of frequency on the defect region, showing that the LDR frequency is 25.25 kHz.

شکل 5 تحلیل دامنه خارج از صفحه سیگنال جابجایی بر حسب فرکانس بر روی منطقه عیب نشان می‌دهد که فرکانس عیب 25/25 کیلوهرتز است.

بنابراین الگوریتم استفاده شده، می‌تواند با خطای حدود 2 درصد، فرکانس تشدید عیب را تشخیص دهد. همچنین لازم به ذکر است که فرکانس تشدید عیب بدست آمده از روابط تئوری،

¹ Eigenfrequency analysis

معیوب، نقطه C، دامنه نوسانی بیشتری نسبت به دو نقطه دیگر از منطقه سالم دارد.

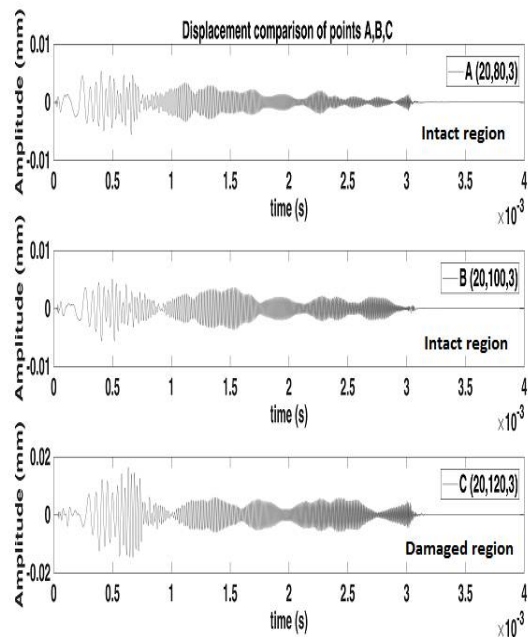


Fig. 4 Comparison of displacements of three monitoring points from intact and damaged regions, showing the amplitude difference at different points can be a useful parameter for identification of the LDR frequency.

شکل 4 مقایسه جابجایی سه نقطه مختلف از منطقه سالم و معیوب عیب نشان می‌دهد که استفاده از تفاوت دامنه جابجایی نقاط مختلف، می‌تواند روشی مفید برای تعیین فرکانس تشدید عیب باشد.

بنابراین استفاده از الگوریتمی که بتواند تغییرات دامنه نقاط مختلف را نسبت به یکدیگر بررسی کند، جهت تعیین فرکانس تشدید عیب می‌تواند سودمند واقع شود. پس از اعمال تبدیل فوریه، به دلیل اینکه در ناحیه عیب، اختلاف دامنه ناحیه عیب نسبت به سایر نقاط بیشتر است، الگوریتم تعیین فرکانس تشدید عیب به صورت نسبت بیشترین دامنه ایجاد شده در ناحیه عیب به مقدار متوسط دامنه در تمام نقاط تعریف می‌شود [15]:

$$f_{LDR} = \arg \max_{(x_d, y_d)} \left\{ \frac{\max_{(x_i, y_i)} u(x_d, y_d, f)}{\text{mean}_{(x_i, y_i)} u(x_i, y_i, f)} \right\} \quad (9)$$

که در آن فرکانس تشدید عیب، بین کران بالا و پایین فرکانس تحریک (200kHz - 1kHz) محدود شده است. با توجه به نامعلوم بودن موقعیت عیب، سطح قطعه به نواحی کوچکتری تقسیم‌بندی می‌شود تا فرکانس تشدید عیب با دقت مناسبی ارزیابی شود. همچنین، با توجه به اینکه بیشینه فرکانس سیستم 200 کیلوهرتز است، برای افزایش دقت در یافتن فرکانس تشدید عیب، دقت فرکانسی 0/25 کیلوهرتز انتخاب می‌شود.

شکل 5، تعیین فرکانس تشدید عیب با استفاده از معادله (9) را نشان می‌دهد که در آن فرکانس تشدید عیب 25/25

$$+2(1-\nu)\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y}\right)^2 \quad (13)$$

که در معادله (13)، $U = u(x, y, z, t)$ جابجایی ایجاد شده در اثر تحریک هارمونیک قطعه و u_z مقدار جابجایی در راستای خارج از صفحه است. با جایگذاری معادله (13) در معادله (12)، گرمای تولید شده به شکل زیر بیان می‌شود:

$$q = \frac{\eta \omega E u_z^2}{2(1-\nu^2)} \left[\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right)^2 + 2\nu \frac{\partial^2 U \partial^2 U}{\partial x^2 \partial y^2} + 2(1-\nu)\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y}\right)^2 \right] \quad (14)$$

شرایط مرزی در موقعیت $z=3 \text{ mm}$ با توجه به انتقال حرارت جابجایی و تشعشع به شکل زیر بیان می‌شود:

$$-n \cdot (-k \nabla T) = h(T_s - T) + \epsilon \sigma (T_s^4 - T^4) \quad (15)$$

که در آن n راستای بردار سطح، h ضریب انتقال حرارت جابجایی و برابر با $5 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}\right)$ ، ϵ ضریب گسیل سطح، T_s دمای محیط که برابر با دمای اولیه قطعه در نظر گرفته شده است، T دمای قطعه و σ ثابت استفان بولتزمن و برابر با $5/67 \times 10^{-8} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}\right)$ است.

4-2- مدل‌سازی گرادیان دما و استفاده از الگوریتم چهار نقطه

جهت مشاهده الگوی دمایی ایجاد شده در محل عیب

پس از تعیین فرکانس تشدید عیب، یک موج سینوسی با دامنه مدوله³ شده که در آن سیگنال حامل⁴ با فرکانس تشدید عیب و سیگنال پیام⁵ با فرکانسی معین در نظر گرفته شده است، به قطعه اعمال می‌شود [24]. معادله (16)، مربوط به موج سینوسی ارسال شده است:

$$U = u_1 \sin(2\pi f_1 t) + u_2 \sin(2\pi f_2 t) \quad (16)$$

که در آن f_1 فرکانس تشدید عیب، f_2 فرکانس سیگنال پیام، t زمان برحسب ثانیه و u_1 و u_2 به ترتیب دامنه سیگنال‌های حامل و پیام هستند.

سیگنال حامل (سیگنال با فرکانس بیشتر) به عنوان سیگنال انتقال دهنده انرژی و سیگنال پیام (سیگنال با فرکانس کمتر) جهت ایجاد طول موج حرارتی مناسب استفاده می‌شود. طول پخش (نفوذ) حرارتی⁶ μ (m)، به شکل زیر تعریف می‌شود [25]:

$$z = C \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f_2}} = C \mu \quad (17)$$

در مقایسه با روش تحلیل فرکانس‌های اصلی 0/8 درصد اختلاف دارد که مطابقت بسیار خوبی را نشان می‌دهد.

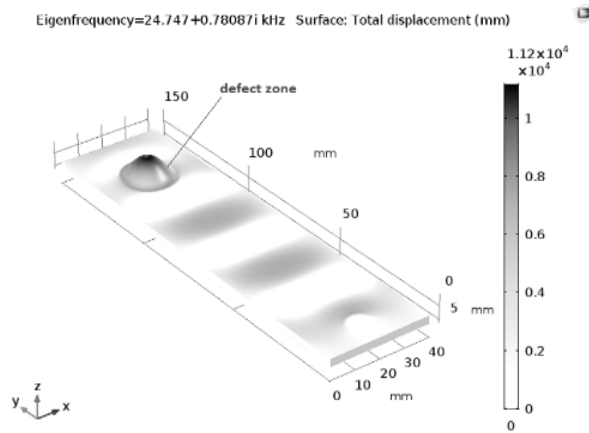


Fig. 6 Eigenfrequency analysis by COMSOL Multiphysics software gives the LDR frequency as 24.75 kHz

شکل 6 تحلیل فرکانس‌های اصلی در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics فرکانس تشدید عیب را 24/75 kHz نشان می‌دهد.

4- تغییرات دما در قطعه

1-4- تحلیل تئوری

معادله انتقال حرارت در یک جسم تحت انتقال حرارت هدایت که منبع تولید حرارت درون آن قرار دارد بر اساس قانون فوریه به صورت زیر بیان می‌شود [22]:

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

که در آن $T(x, y, z, t)$ دمای قطعه در لحظه‌ای معین، $k(x, y, z, t)$ ضریب انتقال حرارت هدایت در راستاهای مختلف (با توجه به اینکه قطعه همسانگرد¹ است این مقدار در همه راستاها برابر است)، C_p گرمای ویژه قطعه و q گرمای تولید شده در مختصات (x, y, z) و در لحظه t می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود [22, 23]:

$$q = \eta \omega W \quad (12)$$

که در آن η ضریب اتلاف ماده، ω فرکانس زاویه‌ای تحریک و W چگالی انرژی کرنش الاستیک² است که برای یک دوره تناوب زمان به شکل زیر تعریف می‌شود [22, 23]:

$$W = \frac{E u_z^2}{2(1-\nu^2)} \left[\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right)^2 + 2\nu \frac{\partial^2 U \partial^2 U}{\partial x^2 \partial y^2} \right]$$

³ Amplitude modulated sine wave

⁴ Carrier signal

⁵ Message signal

⁶ Thermal diffusion length

¹ Isotropic

² Elastic strain energy density

متلب بدست آمد.

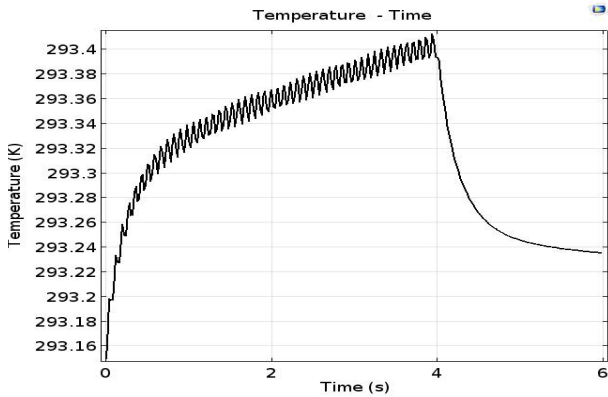


Fig. 7 Temperature versus time at the center of defect, showing 0.25K temperature rise over the excitation time (4 second)

شکل 7 نمودار دما برحسب زمان در مرکز عیب، نشان دهنده 0.25 K افزایش دما در مدت زمان تحریک سیگنال (4 ثانیه) است.

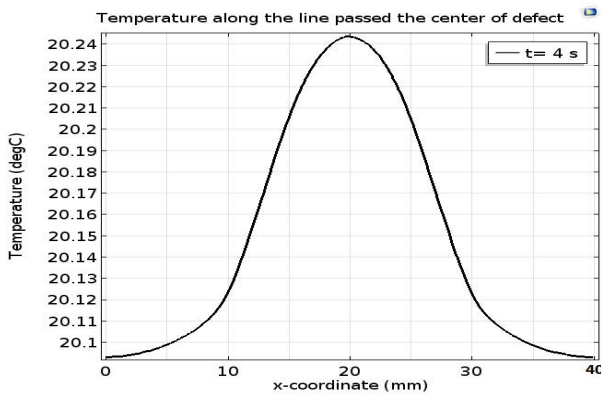


Fig. 8 Temperature profile along the line $y = 125$ mm, $z = 3$ mm and $0 \text{ mm} \leq x \leq 40 \text{ mm}$ crossing the defect zone

شکل 8 منحنی دما در راستای خط عبوری از منطقه عیب $z=3$ و $y=125$ و $0 \leq x \leq 40$ میلی متر

طبق شکل 9، اگر سیگنال ورودی I و سیگنال خروجی S باشند، دامنه A و فاز φ از طریق انتخاب چهار داده در هر سیکل به ترتیب طبق روابط (19) و (20) قابل محاسبه است [31]:

$$A = \sqrt{(s_1 - s_3)^2 + (s_2 - s_4)^2} \quad (19)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{s_1 - s_3}{s_2 - s_4}\right) \quad (20)$$

شکل‌های 10- الف و ب، به ترتیب تصاویر سه بعدی و دو بعدی دامنه ایجاد شده با استفاده از معادله (19) هستند که با توجه به آن‌ها، بیشینه افزایش دما در مرکز عیب است و نقاط خارج از محدوده عیب، هم‌دما با محیط هستند. همچنین شکل‌های 11- الف و ب، که تصاویر سه بعدی و دو بعدی تغییرات فاز با استفاده از معادله (20) هستند، نشان می‌دهد که تغییرات فاز در محدوده عیب نسبت به سایر نقاط کاملاً

که در معادله (17)، z مقدار عمق عیب، و C پارامتری ثابت است که در صورت استفاده از اطلاعات مربوط به دامنه $C=1$ و برای استفاده از اطلاعات فاز $1/5 \leq C \leq 2$ در نظر گرفته می‌شود [25، 26]. α ضریب پخشندگی حرارتی¹ است که توسط معادله زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (18)$$

بطور کلی در آزمون‌های مرتبط با حرارت نگاری، استفاده از تصاویر ایجاد شده از فاز امواج نسبت به استفاده از تصاویر ایجاد شده از دامنه به دلایل مختلفی مانند حساسیت کمتر تغییرات فاز به بازتاب و اثرات تشعشع محیط نسبت به قطعه، گرمایش غیر یکنواخت قطعه و غیره، توصیه می‌شود [25]. در این مدل به منظور بهره‌گیری از اطلاعات فاز، مقدار $C=1/8$ انتخاب شد و فرکانس سیگنال پیام جهت ایجاد طول پخش حرارتی مناسب، $12/8$ هرتز محاسبه شد.

نرخ تصویربرداری با توجه به دوربین‌های حرارت نگاری فلر² در کارهای علمی و آزمایشگاهی، 50Hz در نظر گرفته شد [27]. بطور کلی، در آزمون‌های مرتبط با دمانگاری، به منظور ایجاد تصاویر دامنه و فاز سیگنال‌های حرارتی ایجاد شده، تعداد حداقل 4 تصویر در هر دوره مدولاسیون پیشنهاد می‌شود [28-30]. در این مدل، مدت زمان تحریک قطعه برابر 4 ثانیه و کل زمان تحلیل 6 ثانیه در نظر گرفته شد. فرکانس نمونه‌برداری 50 Hz انتخاب شده است.

شکل 7، نمودار دما بر حسب زمان در مرکز عیب را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود دمای قطعه در مرکز عیب با گذشت زمان زیاد شده است و در انتهای زمان تحریک، اختلاف دمایی در حدود 0/25 کلوین، نسبت به لحظه نخست پیدا کرده است. همچنین پس از قطع تحریک و با گذشت زمان، دمای قطعه روند نزولی یافته و به سمت دمای اولیه میل کرده است.

شکل 8، نمودار دما در موقعیت $z=3$ و $y=125$ و $0 \leq x \leq 40$ میلی‌متر را نشان می‌دهد که ناحیه $10 \leq x \leq 30$ ، ناحیه مربوط به عیب است که بیشترین اختلاف دما با نقاط مجاور در مرکز عیب در $x=20$ mm بدلیل بیشترین دامنه نوسان نسبت به سایر نقاط روی داده است.

تعداد 961 نقطه در موقعیت $z=3$ ، در فواصل 1 mm نسبت به هم جهت استخراج سیگنال‌های دما در نظر گرفته شد و با استفاده از الگوریتم چهار نقطه، تصاویر فاز و دامنه در نرم‌افزار

¹ Thermal diffusivity coefficient

² FLIR thermography camera

به شکل سوراخ دایره‌ای کف‌تخت به قطر 20 mm و ضخامت باقی‌مانده 1 mm، به صورت سه‌بعدی مدل شد.

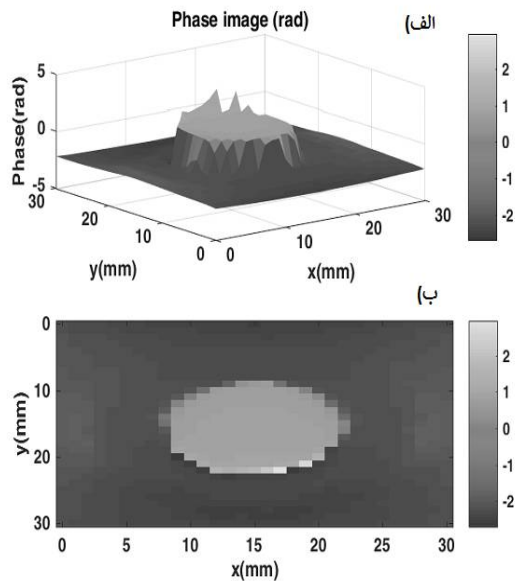


Fig. 11 Images of phase obtained by the measured thermal waves from the top of the sample showing the highest phase difference at the top of the defect zone, a) 3D and b) 2D

شکل 11 تصاویر فاز ایجاد شده با استفاده از سیگنال‌های حرارتی اندازه‌گیری شده از سطح بالایی قطعه که بیشترین اختلاف فاز در محل عیب را نشان می‌دهند، الف) سه بعدی و ب) دوبعدی.

سپس سیگنال‌های اندازه‌گیری شده از روی سطح قطعه شبیه‌سازی شده با استفاده از تحلیل فرکانسی، به منظور استخراج فرکانس تشدید عیب مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. فرکانس تشدید بدست آمده از این روش با نتایج بدست آمده از روابط تئوری و روش تحلیل فرکانس‌های اصلی مقایسه شد. این مقایسه نشان داد که الگوریتم به کار گرفته شده، با خطای قابل قبول 2 درصد می‌تواند فرکانس عیب را بدست دهد. همچنین تطابق خوبی، با خطای 0/8 درصد، بین روابط تئوری و حل اجزای محدود مشاهده شد.

در بخش دوم، در ابتدا با ارسال یک موج سینوسی با دامنه مدوله شده شامل فرکانس تشدید عیب به عنوان فرکانس سیگنال حامل و فرکانس مرتبط با طول نفوذ حرارتی به عنوان فرکانس سیگنال پیام، سیگنال‌های حرارتی اندازه‌گیری شدند. در نهایت با کمک الگوریتم چهار نقطه، تصاویر فاز و دامنه حرارتی به منظور تسهیل در شناسایی و تخمین اندازه و شکل هندسی عیب تشکیل شدند.

محسوس است. علاوه بر این، اختلاف فازی بین نقاط موجود در ناحیه سالم و معیوب مشاهده نمی‌شود. با استفاده از تصاویر ایجاد شده می‌توان شکل هندسی، مکان و اندازه عیب را با دقت بسیار خوبی تخمین زد.

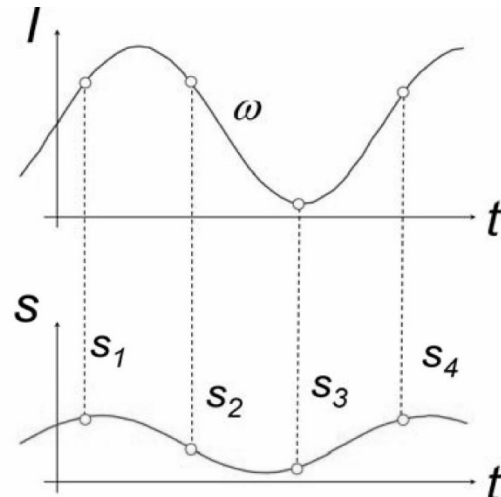


Fig. 9 Principles of thermal wave processing to create amplitude and phase images. I and S are the excitation and measured signals, respectively [25].

شکل 9 اصول پردازش تصاویر حرارتی به منظور ایجاد تصاویر دامنه و فاز، و به ترتیب سیگنال تحریک و سیگنال اندازه‌گیری شده هستند [25].

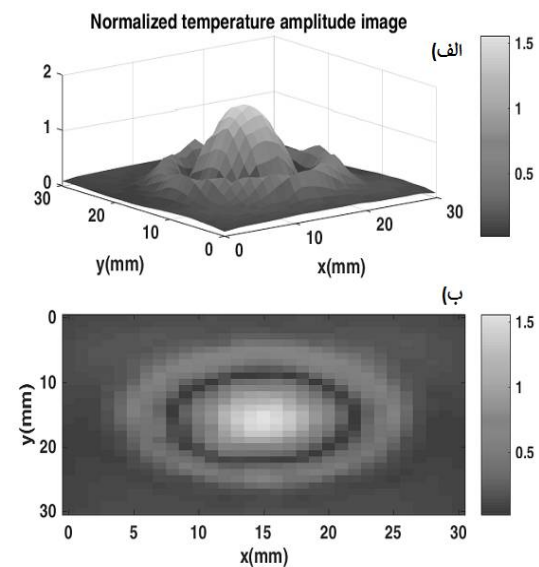


Fig. 10 Images of amplitude obtained by the measured thermal waves from the top of the sample, showing the highest amplitude on the middle of the defect zone, a) 3D and b) 2D.

شکل 10 تصاویر دامنه ایجاد شده با استفاده از سیگنال‌های حرارتی اندازه‌گیری شده از سطح بالایی قطعه که بیشترین دامنه حرارتی در مرکز عیب را نشان می‌دهند، الف) سه بعدی و ب) دوبعدی.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، در بخش اول، یک قطعه آلومینیومی شامل عیبی

6- مراجع

- Proceedings*, 2008, Vol. 975, No. 1, pp. 491-497: AIP.
- [14] M. Morbidini, P. Cawley, The reliable implementation of thermosonics NDT, in *proceedings of 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China*, 2008.
- [15] J. Hettler, M. Tabatabaeipour, S. Delrue, K. Van Den Abeele, Detection and Characterization of Local Defect Resonances Arising from Delaminations and Flat Bottom Holes, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 36, No. 1, p. 2, 2017.
- [16] L. Qin, J. Y. Liu, B. Jiang, Simulation and Experimental Research of Sheet Metal Defect Detection Based on Ultrasonic Lock-in Thermography, in *Advanced Materials Research*, 2013, Vol. 602, pp. 2283-2286: Trans Tech Publ.
- [17] A. Gleiter, G. Riegert, T. Zweschper, G. Busse, Ultrasound lock-in thermography for advanced depth resolved defect selective imaging, *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol. 49, No. 5, p. 272, 2007.
- [18] www.guiguw.com
- [19] C. A. Leckey, K. R. Wheeler, V. N. Hafiyuchuk, H. Hafiyuchuk, D. A. Timuçin, Simulation of guided-wave ultrasound propagation in composite laminates: Benchmark comparisons of numerical codes and experiment, *Ultrasonics*, Vol. 84, pp. 187-200, 2018.
- [20] I. Solodov, J. Bai, G. Busse, Resonant ultrasound spectroscopy of defects: case study of flat-bottomed holes, *Journal of Applied Physics*, Vol. 113, No. 22, p. 223512, 2013.
- [21] I. Solodov, M. Rahammer, D. Derusova, G. Busse, Highly-efficient and noncontact vibrothermography via local defect resonance, *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Vol. 12, No. 1, pp. 98-111, 2015.
- [22] X. Guo, L. Zhu, Vibro-thermography of debonding defects in composite plates based on viscoelasticity heat, *14th Quantitative InfraRed Thermography Conference*, Vol. Germany, 2018.
- [23] J. K. Miller, D. C. Woods, J. F. Rhoads, Thermal and mechanical response of particulate composite plates under inertial excitation, *Journal of Applied Physics*, Vol. 116, No. 24, p. 244904, 2014.
- [24] J. Rantala, D. Wu, G. Busse, Amplitude-modulated lock-in vibrothermography for NDE of polymers and composites, *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 7, No. 4, pp. 215-228, 1996.
- [25] C. Ibarra Castanedo, Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase, 2005.
- [26] S. Ranjit, K. Kang, W. Kim, Investigation of lock-in infrared thermography for evaluation of subsurface defects size and depth, *International*
- [1] X. Han, L. D. Favro, R. L. Thomas, Thermosonic imaging of cracks: applications to teeth, in *European Conferences on Biomedical Optics*, 2001, Vol. 4434, p. 4: SPIE.
- [2] J. Renshaw, J. C. Chen, S. D. Holland, R. B. Thompson, The sources of heat generation in vibrothermography, *NDT & E International*, Vol. 44, No. 8, pp. 736-739, 2011.
- [3] A.-a. Saboktakin, C. Ibarra-Castanedo, A. H. Bendada, X. Maldague, Finite element analysis of heat generation in ultrasonic thermography, in *Proceedings of QIRT*, 2011, pp. 619-24.
- [4] I. Solodov, Resonant ultrasonic imaging of defects for advanced non-linear and thermosonic applications, *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, Vol. 9, No. 3-5, pp. 261-273, 2014.
- [5] X. Han, W. Li, Z. Zeng, L. Favro, R. Thomas, Acoustic chaos and sonic infrared imaging, *Applied Physics Letters*, Vol. 81, No. 17, pp. 3188-3190, 2002.
- [6] K. Reifsnider, E. G. Henneke, W. Stinchcomb, The mechanics of vibrothermography, in *Mechanics of nondestructive testing*: Springer, 1980, pp. 249-276.
- [7] S. M. Parvasi, C. Xu, Q. Kong, G. Song, Detection of multiple thin surface cracks using vibrothermography with low-power piezoceramic-based ultrasonic actuator—A numerical study with experimental verification, *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, No. 5, p. 055042, 2016.
- [8] A. S. Rizi, S. Hedayatrasa, X. Maldague, T. Vukhanh, FEM modeling of ultrasonic vibrothermography of a damaged plate and qualitative study of heating mechanisms, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 61, pp. 101-110, 2013.
- [9] J. M. Piau, A. Bendada, X. Maldague, J. G. Legoux, Nondestructive testing of open microscopic cracks in plasma-sprayed-coatings using ultrasound excited vibrothermography, *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 23, No. 2, pp. 109-120, 2008.
- [10] F. Mabrouki, M. Thomas, M. Genest, A. Fahr, Frictional heating model for efficient use of vibrothermography, *NDT & E International*, Vol. 42, No. 5, pp. 345-352, 2009.
- [11] F. Mabrouki, M. Thomas, M. Genest, A. Fahr, Numerical modeling of vibrothermography based on plastic deformation, *NDT & E International*, Vol. 43, No. 6, pp. 476-483, 2010.
- [12] S. D. Holland *et al.*, Quantifying the vibrothermographic effect, *NDT & E International*, Vol. 44, No. 8, pp. 775-782, 2011.
- [13] S. D. Holland, C. Uhl, J. Renshaw, Toward a viable strategy for estimating vibrothermographic probability of detection, in *AIP Conference*

- evaluating electronic devices and materials*, 2nd Edition, pp.14-33, Springer Science & Business Media, 2010.
- [30] N. Tabatabaei, Development of Frequency and Phase Modulated Thermal-wave Methodologies for Materials Non-destructive Evaluation and Thermophotonic Imaging of Turbid Media, 2012.
- [31] G. BuSe, D. Wu, W. Karpen, Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography, *Journal of Applied Physics*, Vol. 71, No. 8, pp. 3962-3965, 1992.
- Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 16, No. 11, pp. 2255-2264, 2015.
- [27] www.flir.com
- [28] O. Breitenstein, J. Rakotoniaina, F. Altmann, T. Riediger, M. Gradhand, New developments in IR lock-in thermography, in *Proc. 30th ISTFA*, 2004, pp. 595-599.
- [29] O. Breitenstein, W. Warta, M. Langenkamp, *Lock-in thermography: Basics and use for*