مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، مرداد 1399، دوره 7، شماره 5، ص‌ص. 24- 32

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

به کارگیری تکنیک حرارت نگاری پالسی در ارزیابی عیوب خوردگی در ورق‌های فولادی

علیرضا احمدی[1]، محمدرضا فراهانی[2*]، امیررضا اردبیلی[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس البرز، دانشگاه تهران، تهران

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 1 آبان 1398

داوری اولیه: 13 آبان ۱۳۹۸

پذیرش: 26 آذر 1398

کلیدواژگان:

خوردگی

آزمون غیرمخرب

حرارت نگاری پالسی

چکیده

حرارت نگاری پالسی امروزه در صنایع مختلف برای بازرسی و پایش برخی قطعات و مجموعه‌های درحال کار، مورد استفاده قرار می‌گیرد. خوردگی در سازه‌های فلزی و قطعات مکانیکی از مهمترین عیوبی است که هر ساله هزینه‌های زیادی را به صنایع تحمیل می‌کند که با تشخیص به موقع آن می‌توان بخشی از این هزینه‌ها را کاهش داد. روش‌های زیادی برای تشخیص عیب خوردگی وجود دارد اما سرعت زیاد انجام آزمون، عدم نیاز به تماس با نمونه، بررسی و بازرسی سطوح بزرگ در زمان کم و قابلیت انجام آن بر روی بسیاری از مواد، از جمله مزایای حرارت نگاری پالسی است. در این مقاله، برای تشخیص و بررسی عیب خوردگی در ورق‌های فلزی از روش‌های آزمون غیرمخرب، روش حرارت نگاری پالسی استفاده شده است. نمونه‌های مورد آزمایش در این مقاله از جنس فولاد کم کربن و فولاد آلیاژی ساخته شدند که کاربردهای فراوان در صنایع مختلف دارند. هدف این پژوهش شبیه سازی و شناسایی عیوب خوردگی در قطعات فولادی بود. عیوب مختلفی جهت بررسی قدرت این آزمون غیرمخرب در تشخیص حداقل قطر و بیشترین عمق، طراحی و ساخته شدند. اثر فاصله منابع تحریک، زاویه تابش، جنس نمونه‌ها و طول زمان تحریک در آزمون‌های انجام شده، مورد بررسی قرار گرفت. توانایی و قدرت تشخیص عیوب بدون نیاز به پردازش تصویر از مزایای روش به کار برده شده است. از الگوی عیوب ایجاد شده در نمونه ها، در نمونه فولاد کم کربن کوچکترین عیب با قطر 4 میلی‌متر در عمق 1 میلی‌متر و در نمونه فولاد آلیاژی کوچکترین عیب با قطر 3 میلی‌متر در عمق 1 میلی‌متر از سطح قابل تشخیص بودند.

Applying pulse thermography technique for corrosion defect evaluation on the steel plates

Alireza Ahmadi[1], Mohammadreza Farahani[1*], Amirreza Ardebili[2]

1- School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- School of Mechanical Engineering, Alborz Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.

* P.O.B. 1417414418 Tehran, Iran, mrfarahani@ut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 23 October 2019
First Decision: 4 November 2019
Accepted 17 December 2019

Keywords:
Corrosion
Non-Destructive Testing
Pulse Thermography

Abstract

Pulse thermography is used in various industries to inspect and monitor certain parts and assemblies. Corrosion in steel structures and components is one of the most important defects that impose huge costs on industries each year, which can be partially reduced by timely detection. There are many ways to diagnose corrosion, but the high speed of testing, the need to not sample, the inspection of large surfaces in low time, and the ability to perform it on many materials, are the advantages of pulse thermography. In this paper, from non-destructive testing methods, pulsed thermography is used to detect corrosion defects in metal sheets. The samples tested in this paper are made of low carbon steel and alloy steel which have many applications in various industries. The aim of this study was to simulate and identify corrosion defects in steel parts. Various defects were designed and fabricated to evaluate the strength of this non-destructive testing in determining the minimum diameter and maximum depth. The effects of excitation sources distance, radiation angle, material of samples and duration of excitation on the tests were investigated. The ability to detect defects without the need for image processing has been exploited to the advantage of the employed method. From the pattern of defects created in the samples, the smallest detected defect in the low carbon steel specimen was 4 mm in diameter at 1 mm depth and in the alloy steel specimen the smallest detected defect was 3 mm in diameter at 1 mm depth.

1- مقدمه

خوردگی به‌طور کلی، از بین رفتن مواد به علت واکنش با محیط تعریف می‌شود. پدیده خوردگی طبق تعریف، واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی بین یک ماده، معمولاً یک فلز، و محیط اطراف آن می‌باشد که به تغییر خواص ماده منجر خواهد شد. پدیده خوردگی در تمامی دسته‌های اصلی مواد، شامل فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و کامپوزیت‌ها اتفاق می‌افتد اما وقوع آن در فلزات آنقدر شایع و فراگیر بوده و اثرات مخربی به جای

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Ahmadi, M.R. Farahani, A.R. Ardebili, Applying pulse thermography technique for corrosion defect evaluation on the steel plates, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 5, pp. 24- 32, 2020 (in Persian)

می‌گذارد. خوردگی معمولاً فرایندی زیان‌آور است، لیکن گاهی اوقات مفید واقع می‌شود. به‌طور مثال آلودگی محیط به محصولات خوردگی و آسیب دیدن عملکرد یک سیستم از جنبه‌های زیان‌آور خوردگی و تولید انرژی الکتریکی در یک باطری و حفاظت کاتدی سازه‌های مختلف از فواید آن هستند، اما تأثیرات مخرب و هزینه‌های به بار آمده بواسطه این فرایند به مراتب بیشتر است. امروزه هر کارخانه یا تاسیسات برای تشخیص عیوب پنهان خود حتما نیاز به خدمات تخصصی ترموگرافی خواهد داشت. ترموگرافی مادون قرمز یکی از جذاب‌ترین تکنولوژی‌های امروزی است که برای انجام امور جاری شغل‌های تعمیرات و نگهداری در صنایع مختلف وارد شده است. استفاده از دوربین‌های حرارت نگاری کلیه عیوبی که منجر به تغییر در الگوی توزیع دمای سطحی می‌شوند، قابل شناسایی خواهند بود. دوربین حرارتی با بررسی امواج مادون قرمز ساطع شده از تجهیزات، نقاط داغ را شناسایی کرده و نمایش می‌دهد و این یکی از مزیت‌های عمده این دستگاه است که بدون قطع تجهیزات و عدم اتصال به وسیله خاصی با قرائت میزان دمای آن نقطه و مقایسه با دمای محیط و شرایط می‌توان میزان اهمیت نقطه مورد بررسی را سنجید و جهت رفع عیب آن طبق یک برنامه از پیش تعیین شده اقدام نمود، ضمن اینکه بعد از رفع عیب نیز می‌توان به بررسی پرداخت و از رفع عیب تجهیز اطمینان حاصل نمود.

گرینزاتو و واویلو، از تکنیک حرارت نگاری مادون قرمز گذرا برای توصیف عیب خوردگی پنهان استفاده کردند [1]. آن‌ها یک مدل انتقال حرارت سه بعدی را برای آسیب‌های خوردگی توسعه داده و یک الگوریتم ساده بر پایه دمای سطحی وابسته به زمان، برای تشخیص تغییرات ضخامت ناشی از خوردگی ارائه دادند. گرینزات و همکاران یک مدل یک بعدی حرارتی برای قطعات ضخیم استوانه‌ای و کره‌ای شکل در تشخیص خوردگی به کار گرفتند [2]. آنها گزارش دادند که منطقه خورده شده را می‌توان با ماکزیمم کنتراست حرارتی و زمان ظهور با مقدار کنتراست حرارتی ماکزیمم، توصیف کرد. مورینتی و واویلو از حرارت نگاری مادون قرمز برای توصیف و کشف عیوب خوردگی پنهان در ورق‌های ضخیم فلزی استفاده کردند [3]. هان و پارک از حرارت نگاری مادون قرمز برای تشخیص خوردگی در قطعات فولادی پوشیده شده با مواد ارگانیک استفاده کردند. مشاهده شد اختلاف دما در محل عیوب بیشترین مقدار است [4]. همچنین مطالعات مشابه‌ای توسط جانسون و همکاران [5] و شونبرگر و همکاران [6]، گزارش شد. حرارت نگاری مادون قرمز همچنین برای تشخیص عیب خوردگی در پنل‌های آلومینیومی هواپیماها استفاده شد [7]. لویو و همکاران از تکنیک حرارت نگاری پالسی برای تشخیص خوردگی حفره‌ای در لوله‌های فلزی استفاده کردند [8]. اندازه‌گیری همبستگی فازی و تحلیل اجزا اصلی صورت گرفت و مشاهده شد که یک رابطه خطی با کاهش مواد نشان می‌دهد. مطالعات نشان داد که سطح قابل قبول دقت در تکنیک حرارت نگاری، زمانی فراهم می‌شود که حداقل کاهش ضخامت در خوردگی 20% ضخامت دیواره باشد [9]. چانگ و همکارانش از حرارت نگاری مادون قرمز برای اندازه‌گیری خوردگی در لوله‌های تقویت شده استفاده کردند و متوجه شدند که نرخ افزایش دما در محدوده خوردگی افزایش می‌یابد [10]. لی و شن گزارش دادند که حرارت نگاری یک ابزار قوی برای تشخیص خوردگی حفره‌ای و کاهش ضخامت در خط لوله دما بالا در صنایع پتروشیمی می‌باشد [11]. مطالعات آنها نشان داد که حرارت نگاری حرارتی عیوب خوردگی بزرگتر از قطر 10 میلی‌متر و 40% ضخامت از عمق را تشخیص دهد. شکل 1 تصاویر حرارتی منطقه خوردگی در صفحه الومینیومی را نشان می‌دهد. در تصویر فازی (b) می‌توان دید که منطقه خوردگی به راحتی قابل تشخیص است [12].

یک بازبینی از تاریخچه مهندسی مادون قرمز توسط آقای هادسون در سال 1969 انجام شد [13]. در سال 1935 نیکلاس استفاده از یک دماسنج مادون قرمز برای آنالیز رول فلزات داغ پیشنهاد داد [14]. در سال 1937، ورنوت یک روش حرارت نگاری فعال برای مطالعه خواص حرارتی مواد پیشنهاد داد که روش‌های مشابه آن تا به امروز باقی مانده است [15]. یک روش حرارت نگاری فعال مشابه روش‌های اخیر در سال 1965، توسط بلر برای بازرسی پوسته موتور راکت پلاریس پیشنهاد شد [16]. در دوره مسابقات فضایی تعدادی از محققان هواپیما وارد مبحث تست غیرمخرب حرارتی شدند و کمیته مادون قرمز توسط انجمن تست‌های غیرمخرب امریکا ASNT ایجاد شد.

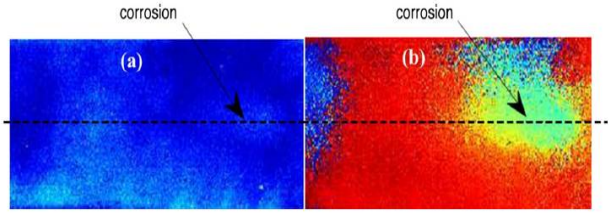

Fig. 1 Thermal image of the corrosion zone on the aluminum plate (a) Amplitude image (b) Phase image [12]

شکل 1 تصویر حرارتی منطقه خوردگی در صفحه الومینیومی (a) تصویر دامنه (b) تصویر فازی [12]

در آن زمان بیشتر فعالیت‌های تست غیرمخرب حرارتی با تکنیک امواج یا پالسی حرارتی انجام می‌شد. بحث در مورد اینکه کدام روش موثرتر است برای چند دهه ادامه داشت [17-23].

عیوب حاصل از خوردگی، عمر قطعات را کاهش می‌دهد و بازرسی وضعیت بدون تماس بر پایه حرارت نگاری، یک تخمین از کاهش مواد بر اثر خوردگی ارائه می‌دهد و در نتیجه در ارزیابی عمر باقی مانده قطعات کمک می‌کند. در حرارت نگاری پالسی، پس از اعمال پالس حرارتی، اندازه‌گیری تکامل دمای سطح نمونه با یک دوربین مادون قرمز که نقایص زیرسطحی را نشان می‌دهد. دمای مواد به سرعت پس از اختلال حرارتی اولیه تغییر می‌کند، زیرا جبهه حرارتی با انتشار در زیر سطح انتشار می‌یابد. حضور نقص موجب کاهش میزان انتشار می‌شود. بطوریکه هنگام مشاهده دمای سطح، نقص‌ها به عنوان مناطق دمایی مختلف با توجه به مناطق سالم اطراف ظاهر می‌شود. ارزیابی و تشخیص عیب خوردگی در ورق‌های فلزی به روش حرارت نگاری فعال موضوع این تحقیق است. از روش‌های آزمون و بازرسی غیرمخرب، روش حرارت‌نگاری فعال در تشخیص عیوب استفاده شد. در این پژوهش برای تشخیص و ارزیابی خوردگی آزمون‌های مختلفی طراحی و اجرا گردد. توانایی این روش در تشخیص عیوب، حساسیت زاویه منابع تحریک حرارتی، فاصله منابع تحریک و زمان پالس تحریک حرارتی در شناسایی عیوب از اهداف این پژوهش بودند.

2- تکنیک حرارت نگاری

تکنولوژی مادون قرمز بر این پایه استوار است که همه اجسام از خودشان انرژی منتشر می‌کنند و تابش فروسرخ یک فرم از این انرژی می‌باشد. سیستم تصویر برداری حرارتی مادون قرمز یا دوربین‌های مادون قرمز تجهیزاتی هستند که با اندازه‌گیری شدت تابش مادون قرمز گسیل شده از سطح سوژه، تصاویری از دمای سطح سوژه تهیه می‌کنند. حرارت نگاری هم برای سوژه و هم بازرس بسیار ایمن است، چرا که روش غیرتماسی است.

بازرسی حرارت نگاری در صورتی امکان‌پذیر است که جسم تحت بازرسی، با محیط بیرون از خود درگیر انتقال حرارت باشد و یک گرادیان دمایی طبیعی با محیط اطراف خود داشته باشد. از نقطه نظر سخت‌افزاری، بسته به اینکه این گرادیان دمایی را ما ایجاد کنیم و یا ناشی از کارکرد جسم، بطور طبیعی وجود داشته باشد؛ بازرسی به دو روش بازرسی فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شود.

در بازرسی حرارت نگاری فعال، تحریک حرارتی جسم به عهده اپراتور می‌باشد و اپراتور با ایجاد یک گرادیان دمایی بین جسم و محیط و حالت انتقال حرارت گذار بین این دو، نحوه پاسخ جسم را به این شرایط بررسی می‌شود. در بازرسی حرارت نگاری غیرفعال به دلیل شرایط کاری جسم، این گرادیان دمایی بطور طبیعی وجود دارد و اپراتور تنها به دریافت تشعشعات مادون قرمز و تحلیل آنها، اکتفا می‌کند.

در زمینه آزمون غیرمخرب، حرارت نگاری پالسی به دلیل سرعت بالا در بازرسی محبوب است. برای مواد هدایت حرارتی بالا (مانند آلومینیوم) مدت تحریک حرارتی فقط چند میلی ثانیه طول می‌کشد. در حالی که مدت زمان آزمایش نمونه‌های هدایت حرارتی کم (مانند پلاستیک‌ها، کامپوزیت‌ها، فولادها و غیره) مدت تحریک حرارتی چند ثانیه است [24، 25].

3- آماده‌سازی و ساخت نمونه‌ها

از دو ورق به ضخامت 5 میلی‌متر، مربعی شکل به ضلع 15 سانتی‌متر، از جنس فولاد کم کربن و فولاد آلیاژی انتخاب شدند. بر روی هر دو نمونه، الگوهایی سوراخ کاری گردید. با توجه به شکل 2، قطر این سوراخ‌ها از 5 تا 2 میلی‌متر و با عمق‌های 1 تا 4/7 میلی‌متر می‌باشد. همچنین، قطر سوراخ‌ها بصورت عمودی ثابت و بصورت افقی از چپ به راست کاهش می‌یابند. عمق سوراخ‌ها بصورت افقی ثابت و بصورت عمودی کاهش می‌یابند. جهت به حداقل رساندن نویزهای ناشی از بازتاب نور و جذب حداکثر حرارت اعمالی به نمونه‌ها، پشت نمونه‌ها با اسپری مشکی مات رنگ آمیزی شد. در شکل 2 نقشه نمونه‌های ساخته شده آورده شده است.

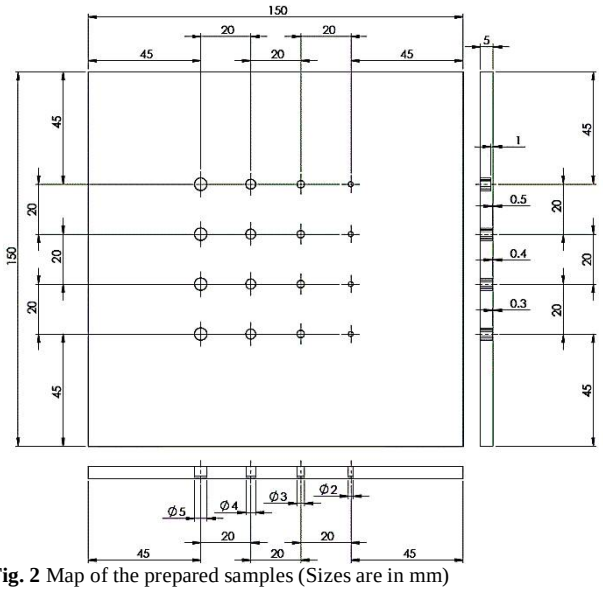

Fig. 2 Map of the prepared samples (Sizes are in mm)

شکل 2 نقشه نمونه‌های ساخته شده (اندازه‌ها به میلی‌متر هستند)

4- آماده سازی چیدمان حرارت نگاری و طراحی آزمایشات

تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها، یک دوربین حرارتی فلیر سری A دارای رزولیشن 360×240 با توانایی ضبط 9 الی 60 هرتز، دقت 0/01 درجه سانتی‌گراد و دو پروژکتور با توان 1 کیلووات بودند. تمامی آزمایش‌ها در دمای محیط 27 درجه سانتی‌گراد، در محیط بسته آزمایشگاه اجرا شد. پارامترهای مورد بررسی عبارتند از تاثیر زمان پالس، فاصله منبع تحریک تا نمونه HSD[1]، زاویه تابش HSRA[2] و درنهایت جنس نمونه می‌باشند. فاصله دوربین از نمونه 30 سانتی‌متر در نظر گرفته شد که با توجه به ابعاد نمونه و نقطه فوکوس دوربین ثابت می‌باشد. دوربین عمود بر سطح نمونه قرار گرفت. بر این اساس 16 تست انجام گرفت که به ترتیب، زاویه و فاصله منابع تحریک را تنظیم و ثابت کرده و پالس‌های 5 ثانیه و سپس 10 ثانیه اعمال شد و این تست‌ها با تغییر زاویه و فاصله و در نهایت تغییر جنس نمونه ادامه پیدا کرد.

5- بحث بر روی نتایج بدست آمده

5-1- اثر فاصله منابع تحریک

در ابتدا آزمایشی با دو پروژکتور تنگستنی را با زاویه 40 درجه نسبت به سطح نمونه فولاد کم کربن و در فاصله‌های 30 سانتی‌متر و 60 سانتی‌متر طراحی شد. تحریک برای هر دو تست 5 ثانیه در نظر گرفته شد. در شکل 3 تصاویری از هر آزمون که در بهترین کنتراست حرارتی در طول تست قرار داشتند، آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، دمای سطح نمونه HSD 30Cm بالاتر و وضوح عیوب و همچنین تعداد عیوب قابل تشخیص نیز بیشتر است.

شکل 4 در راستای عیوب با قطر 5 و 4 میلی‌متر دو مسیر ایجاد شد و نمودار دما - پیکسل آن استخراج گردید و نمودارهای دو آزمایش، در هر قطر با هم مقایسه شد که در شکل تفاوت‌ها به وضوح مشخص می‌شوند.

در تصاویر شکل 5، در نمودار دما-پیکسل عیوب با قطر 5 مشاهده می‌شود که کنتراست حرارتی در تست HSD 30Cm بالاتر از تست HSD 60Cm می‌باشد و تشخیص عیوب به علت کنتراست بالا راحت‌تر است. همچنین مرز بین عیوب و سطح سالم نمونه، تیزتر و به ابعاد واقعی نزدیکتر هستند. در تصاویر شکل 5، در نمودار دما - پیکسل عیوب با قطر 4 میلی‌متر نتایج مشابهی را نشان می‌دهد.

[1] Heat Source Distance
[2] Heat Source Radiation Angle

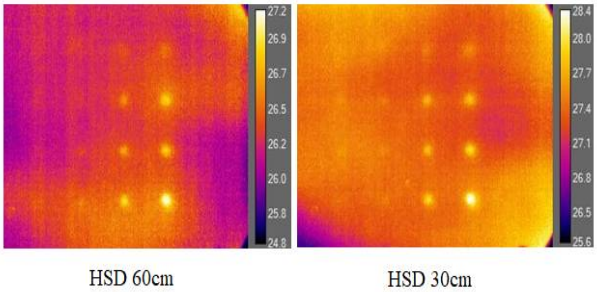

Fig. 3 Comparison the effect of distance in thermal images of low-carbon steel sample (St37)

شکل 3 مقایسه اثر فاصله در تصاویر حرارتی نمونه فولاد کم کربن (St37)

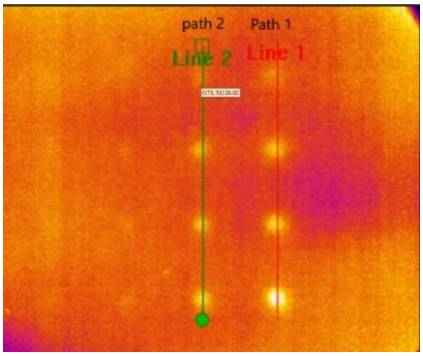

Fig. 4 The drawn paths along the defects in low-carbon steel sample (St37)

شکل 4 مسیرهای رسم شده در راستای عیوب نمونه فولاد کم کربن (St37)

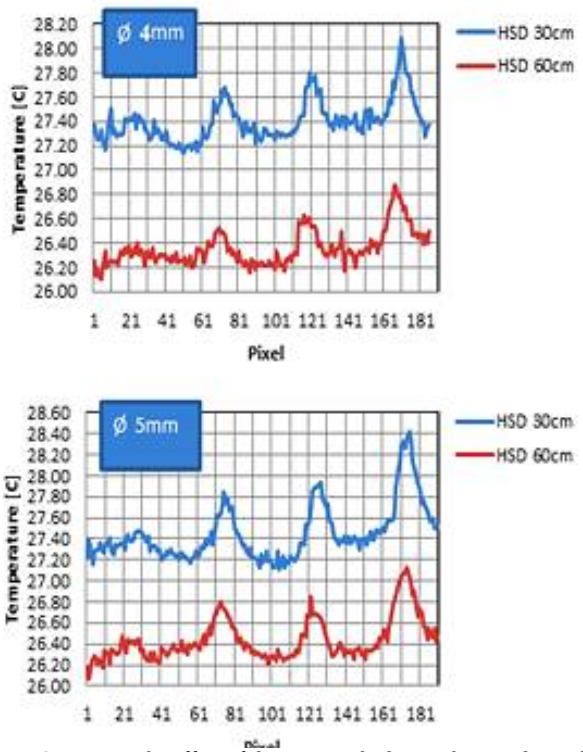

Fig. 5 Comparing the effect of distance on the low-carbon steel sample (St37)

شکل 5 مقایسه نمودارهای اثر فاصله در نمونه فولاد کم کربن (St37)

در آزمایش دیگری چیدمان همانند آزمون اول برای نمونه

فولاد آلیاژی نیز انجام داده شد. بهترین وضوح از آزمون‌ها در شکل 6 آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، دمای سطح نمونه HSD 30Cm بالاتر و وضوح عیوب با قطر کمتر، بیشتر است.

اگر در راستای عیوب با قطرهای 5، 4 و 3 میلی‌متر مسیری کشیده و نمودار دما-پیکسل آن استخراج شود و نمودارها با هم مقایسه شود، تفاوت‌ها به وضوح مشخص خواهند شد. در شکل 7 که نمودار دما-پیکسل عیوب با قطرهای 3، 4 و 5 میلی‌متر را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که دمای نقاط مختلف آزمون HSD 30Cm از آزمون HSD 60Cm بالاتر است و همچنین کنتراست حرارتی (اختلاف دمای بین نقاط بدون عیب نمونه و محل‌های معیوب) در تست HSD 30Cm بالاتر از تست HSD 60Cm می‌باشد و تشخیص بصری عیوب به علت کنتراست حرارتی بیشتر راحت‌تر است.

در نهایت می‌توان گفت که هرچه منبع حرارتی از سطح نمونه دورتر باشد، مقدار انرژی انتقالی به سطح نمونه و به دنبال آن نرخ افزایش دما نیز کاهش می‌یابد.

5-2- اثر تابش منابع تحریک

برای بررسی اثر زاویه تابش منابع تحریک، دو آزمایش طراحی شد که در آن دو پروژکتور در زاویه 60 درجه نسبت به سطح نمونه و در فاصله 60 سانتی‌متری از آن قرار گرفته و تحت تحریک 5 ثانیه‌ای قرار گرفت. در آزمون دیگری همین آزمایش با زاویه 40 درجه انجام شد. شکل 8 تصویر دمایی دو تست در بهترین کنتراست حرارتی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است در شکل HSRA 60° وضوح عیوب (کنتراست حرارتی بیشتر) بهتر از شکل HSRA 40° می باشد.

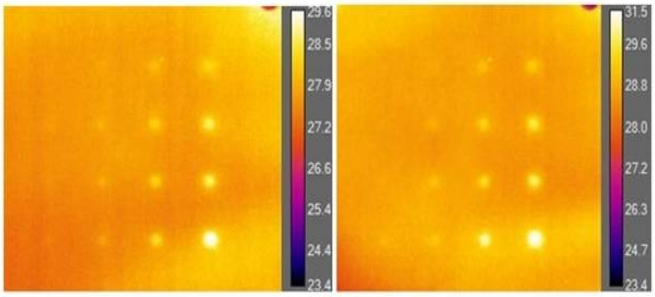

Fig. 6 Comparing the distance effect in thermal image of alloy steel sample (SS304)

شکل 6 مقایسه اثر فاصله در تصاویر حرارتی نمونه فولاد آلیاژی (SS304)

در نمودار دما-پیکسل شکل 9 که مربوط به دما در مسیر عیوب با قطر 5 میلی‌متر می‌باشد، مشاهده می‌شود که کنتراست حرارتی تست HSRA 40° (اختلاف دمای محل عیب با سایر نقاط) بالاتر از تست HSRA 60° است. بنابر این وضوح عیوب از نقاط بدون عیب، زمانی که زاویه تابش به سمت عمود بر سطح نمونه میل کند، بیشتر خواهد بود. در نمودار دما-پیکسل که مربوط به دمای نقاط مختلف در مسیر عیوب با قطر 4 میلی‌متر می‌باشد کنتراست حرارتی با افزایش زاویه تابش نسبت به سطح نمونه، افزایش می‌یابد.

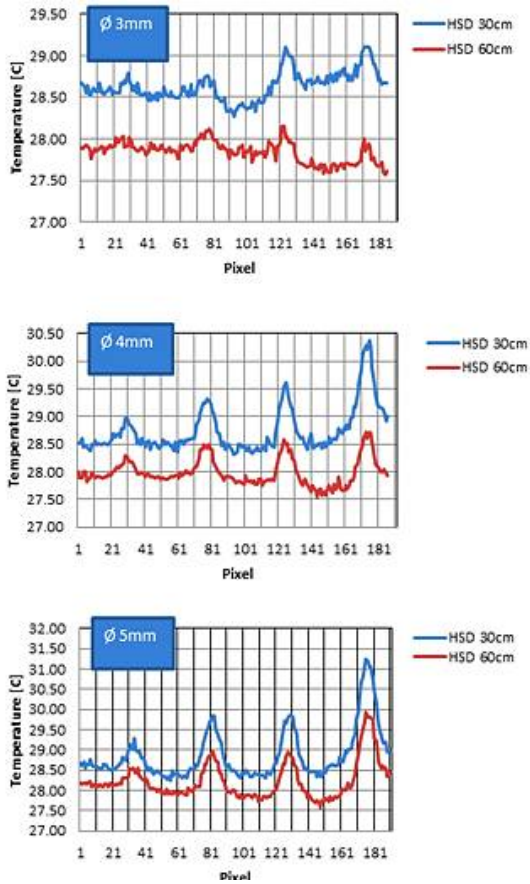

Fig. 7 Comparing the effect of distance on the alloy steel sample (SS304)

شکل 7 مقایسه نمودارهای اثر فاصله در نمونه فولاد آلیاژی (SS304)

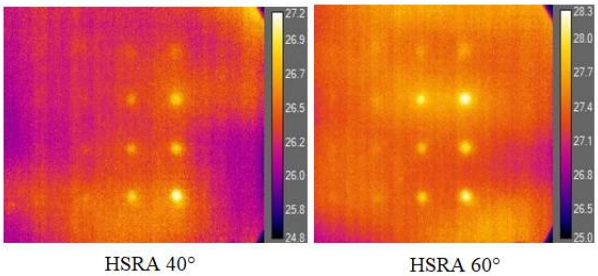

Fig. 8 Compariing the radiation angle effect on low-carbon steel sample (St37)

شکل 8 مقایسه اثر زاویه تابش در تصاویر حرارتی نمونه فولاد کم کربن (St37)

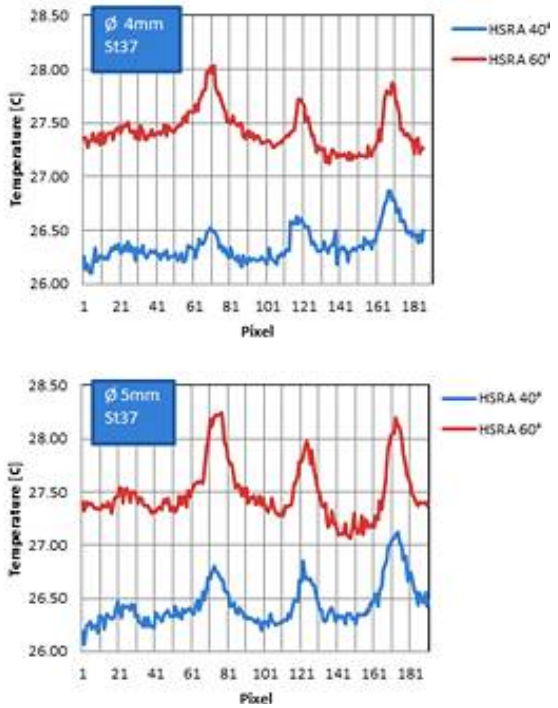

Fig. 9 Comparing the radiation angle effect on the low-carbon steel sample (St37)

شکل 9 مقایسه نمودارهای اثر زاویه تابش در نمونه فولاد کم کربن (St37)

در آزمون دیگری، دو پروژکتور در زاویه 40 درجه و در فاصله 60 سانتی‌متری نسبت به نمونه فولاد آلیاژی قرار گرفته و تحت تحریک 5 ثانیه‌ای قرار گرفت. سپس همین چیدمان، در آزمون دیگری با زاویه 60 درجه انجام گرفت. در شکل 10 HSRA 60° وضوح عیوب (کنتراست حرارتی بیشتر) بهتر و تعداد عیوب قابل رویت بیشتر است.

اگر در راستای عیوب با قطرهای 5، 4 و 3 میلی‌متر مسیرهایی ایجاد شود و نمودار دمایی آن در هر دو تست مورد بررسی قرار گیرد، تفاوت‌ها مشخص‌تر خواهند شد. همان‌طور که در نمودار دما-پیکسل شکل 11 مشاهده می‌شود، کنتراست حرارتی عیوب 5 میلی‌متر در تست HSRA 60° بالاتر از تست HSRA 40° می‌باشد. بنابراین عیوب با وضوح بیشتری قابل رویت خواهند بود. در نمودار دما-پیکسل عیوب با قطر 4 میلی‌متر، مشاهده می‌شود که کنتراست حرارتی تست HSRA 60° از تست HSRA 40° بالاتر است. در نمودار دما-پیکسل که مربوط به دمای نقاط مختلف در مسیر عیوب 3 میلی‌متر است، مشاهده می‌شود که همچنان کنتراست حرارتی نمودار تست HSRA 60° بیشتر از تست HSRA 40° می‌باشد و تشخیص عیوب با قطر کمتر و عمق بیشتر راحت‌تر است.

قدرت شناسایی عیوب و وضوح تصاویر حرارتی با افزایش زاویه تابش حرارت بهبود می‌یابد. یکی از دلایل عمده آن افزایش انعکاس امواج انرژی از سطح نمونه و عدم جذب آن است. بنابراین هرچه زاویه منابع تحریک نسبت به سطح نمونه به 90 درجه نزدیک شود، میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد. در نتیجه نرخ افزایش دمای سطح نمونه، افزایش می‌یابد، شناسایی عیوب با قطرکوچکتر امکان پذیر شده و همچنین رویت عیوب سریع تر شده می‌شود.

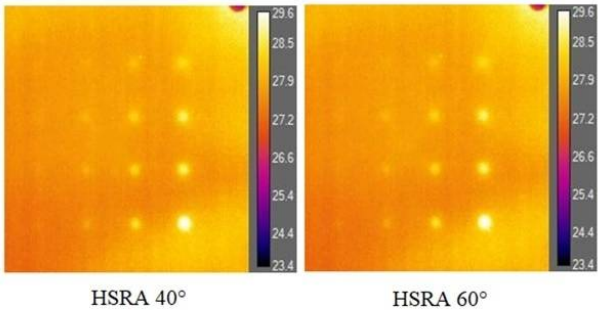

Fig. 10 Comparing the radiation angle effect in the thermal image of the alloy steel sample (SS304)

شکل 10 مقایسه اثر زاویه تابش در تصاویر حرارتی نمونه فولاد آلیاژی (SS304)

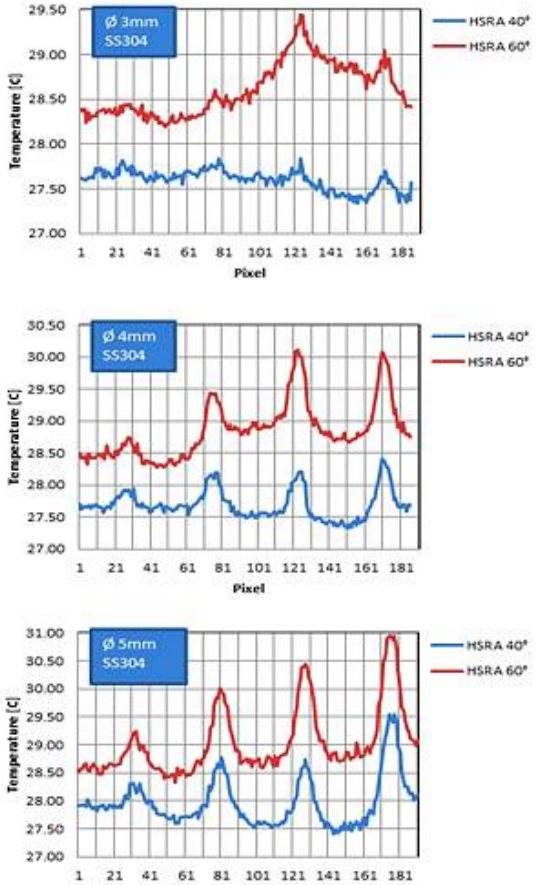

Fig. 11 Comparing the radiation angle effects for alloy steel sample (SS304)

شکل 11 مقایسه نمودارهای اثر زاویه تابش نمونه فولاد آلیاژی (SS304)

3-5- بررسی اثر جنس

برای بررسی اثر جنس در آزمون‌ها، دو نمونه فولاد کم کربن و فولاد آلیاژی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. چیدمان‌های مختلف روی این دو جنس صورت گرفته که در بررسی های قبل برخی از آنها آورده شده بود.

چیدمان انجام تست بدین صورت بود که، پروژکتورها در فاصله 30 سانتی‌متری نمونه و در زاویه 60 درجه نسبت به سطح نمونه قرار داشتند. هر دو جنس تحت تحریک پالسی 5 ثانیه‌ای قرار گرفت. همان‌طور که در تصویر حرارتی 12 نمونه فولاد کم کربن قابل مشاهده است، دو عیب با قطر 5 و 4 میلی‌متر در عمق 0/3 میلی‌متر، با وضوح بالا و چهار عیب با قطر 4 و 5 میلی‌متر در عمق های 0/4 و 0/5 میلی متر با وضوح کمتر و دو عیب با قطر 4 و 5 میلی‌متر در عمق 1 میلی‌متر به سختی قابل رویت هستند. کوچکترین عیب قابل مشاهده با قطر 4 میلی‌متر و در عمق 1 میلی‌متر از سطح نمونه می‌باشد. در تصویر حرارتی 12 نمونه فولاد آلیاژی، عیوب مشاهده شده عبارتند از عیوب با قطر 5 میلی‌متر، در عمق‌های 0/3، 0/4 و 0/5 میلی‌متر از سطح و عیوب با قطر 4 میلی‌متر در عمق‌های 0/3 و 0/4 میلی‌متر، با وضوح بالا، دو عیب با قطر 5 میلی‌متر در عمق 1 میلی‌متر و قطر 4 میلی‌متر در عمق 0/5 میلی‌متر از سطح، با وضوح کمتر و تعداد چهار عیب با قطر 4 میلی‌متر در عمق 1 میلی‌متر و قطر 3 میلی‌متر در عمق‌های 0/3، 0/4 و 0/5 میلی‌متر، با وضوح پایین قابل شناسایی هستند. در شکل 12 در مجموع بدون پردازش تعداد 11 عیب قابل شناسایی هستند که کوچکترین آن عیب با قطر 3 میلی‌متر در عمق 0/5 میلی‌متر از سطح می‌باشد. شکل نمودار دما-پیکسل نمونه فولاد کم کربن (St37)، بر روی مسیرهای کشیده شده بر روی قطرهای مختلف عیوب را نشان می‌دهد. قله‌های موجود در نمودار محل وجود عیوب می‌باشند. کلیه عیوب با قطرهای 4 و 5 میلی‌متر قابل شناسایی هستند.

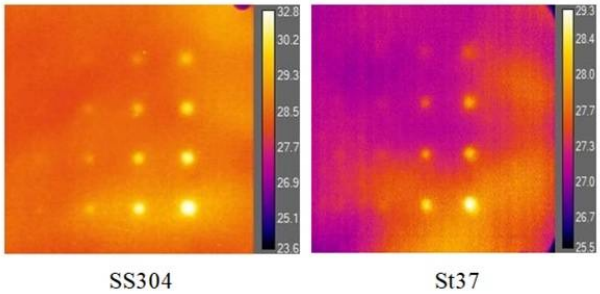

Fig. 12 Comparing the thermal images of two different materials

شکل 12 مقایسه تصاویر حرارتی دو جنس مختلف

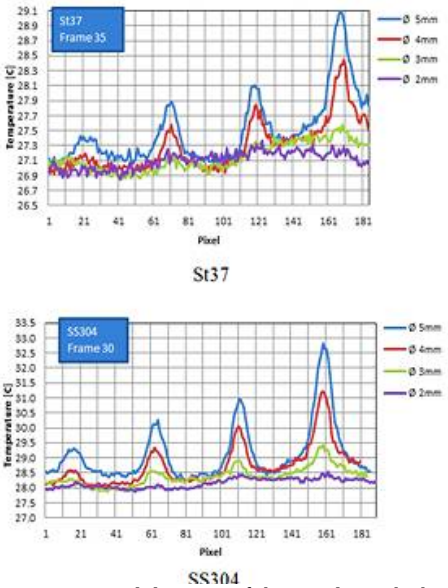

Fig. 13 Temperature-pixel diagrams of the samples at the best thermal contrast condition

شکل 13 نمودار دما-پیکسل سطح نمونه‌ها در بهترین کنتراست حرارتی

نمودار دما-پیکسل سطح نمونه فولاد آلیاژی (SS304)، برروی مسیرهای کشیده شده بر قطرهای مختلف عیوب را نشان می‌دهد. قله‌های موجود در نمودار محل وجود عیوب می‌باشند. همان‌طور که در این نمودار قابل مشاهده است کلیه عیوب با قطرهای 4 و 5 میلی‌متر و عیوب با قطر 3 میلی‌متر با عمق‌های 0/3، 0/4 و 0/5 میلی‌متر قابل شناسایی هستند.

6- جمع‌بندی نتایج

بطور کلی تعداد عیوب قابل تشخیص در فولاد آلیاژی بیشتر بود. زمان رویت عیوب در هنگام تحریک حرارتی، برای فولاد زنگ نزن حدود 1/215 ثانیه و برای فولاد کم کربن حدود 0/199 ثانیه بوده است. هر چقدر دمای اولیه قطعه پایین‌تر باشد، باید مدت زمان بیشتری صرف پالس تحریک حرارتی قطعه شود و هر چقدر دمای اولیه قطعه پایین‌تر باشد, فرصت و زمان بیشتری برای شناسایی عیوب وجود دارد. عیوب در بازه زمانی خاص قابل شناسایی هستند و طولانی شدن پالس تأثیری در افزایش عیوب قابل تشخیص ندارد. از دلایل مشاهده نشدن برخی عیوب کوچک و برخی عیوب با عمق‌های بیشتر می‌توان به کم بودن قدرت شوک حرارتی یا انرژی ورودی در پالس‌های کوتاه‌تر از 1 ثانیه اشاره کرد. همان‌طور که ژی زنگ و همکاران، با استفاده از منبع تحریک فلاش لامپ 4/8 کیلوژولی با پالس 1 ثانیه‌ای موفق به شناسایی تمام عیوب ایجاد شده در نمونه فولادی شدند [22]. همچنین مقدار هدایت حرارتی ماده در تشخیص عیوب

تأثیرگذار است. هر چقدر مقدار هدایت حرارتی ماده بیشتر باشد، برای شناسایی عیوب به مقدار قدرت شوک حرارتی بیشتری در پالس‌های کوتاه نیاز دارد. زیرا حرارت به سرعت در نمونه پخش می‌شود و عیوب در بازه زمانی کوتاه‌تری قابل شناسایی هستند.

هدف این مقاله تشخیص و بررسی عیوب خوردگی در ورق‌های فلزی با روش آزمون‌های غیرمخرب و آزمون حرارت نگاری فعال بود. طراحی و ساخت عیوب و نمونه‌ها با تجهیزات در دسترس، انجام گرفت. سوراخ‌ها با نسبت قطر به عمق (D/L) از 16 تا 2 میلی‌متر، در نمونه‌ها ایجاد شد. نسبت قطر به عمق در فرآیندهای سوراخ‌کاری عمیق[1] کاربرد دارد [23]. نقص‌ها، سوراخ‌های کف تخت هستند که در ورق فولادی کم کربن و ورق فولادی آلیاژی ایجاد شده‌اند. عیوب پس از تحریک حرارتی نوری مورد ارزیابی قرار گرفتند. از جمله نتایج بدست آورده از آزمایش‌ها این بود که :

- منابع تحریک در فاصله 30 سانتی‌متری نمونه، تعداد 8 عیب در جنس فولاد کم کربن و 11 عیب در فولاد آلیاژی قابل شناسایی شدند و در فاصله 60 سانتی‌متر نمونه، تعداد 6 عیب در فولاد کم کربن و 10 عیب در فولاد آلیاژی قابل تشخیص بودند.

- کوچکترین عیوب قابل تشخیص در نمونه فولاد کم کربن، عیب با قطر 4 میلی متر در عمق 1 میلی‌متر و در نمونه فولاد آلیاژی، عیب با قطر 3 میلی‌متر در عمق 1 میلی‌متر بود.

- در مقایسه تصاویر حرارتی نمونه فولاد آلیاژی با فولاد کم کربن، مشاهده شد که وضوح و تعداد عیوب قابل تشخیص در تصاویر حرارتی نمونه فولاد آلیاژی بیشتر است.

- بهترین میزان زمان تحریک برای دو جنس تحت آزمایش، 2 تا 5 ثانیه بود و برای هر دو جنس افزایش زمان تحریک، تأثیری در تعداد عیوب قابل شناسایی و وضوح آن‌ها نداشت.

7- مراجع

[1] E. Grinzato, V. Vavilov, Corrosion evaluation by thermal image processing and 3D modelling, *Revue Générale de Thermique*, Vol. 37, pp. 669–679, 1998.

[2] E. Grinzato, V. Vavilov, P.G. Bison, S. Marinetti, Hidden corrosion detection in thick metallic components by transient IR thermography, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 49, pp. 234–238, 2007.

[3] S. Marinetti, V. Vavilov, IR thermographic detection and characterization of hidden corrosion in metals: general analysis, *Corrosion Science*, Vol. 52, pp. 865–872, 2010.

[4] J.S. Han, J.-H. Park, Detection of corrosion steel under an organic coating by infrared photography, *Corrosion Science*, Vol. 46, pp. 787–793, 2004.

[5] M. Jonsson, B. Rendahl, I. Annergren, The use of infrared thermography in the corrosion science area, *Materials and Corrosion*, Vol. 61, pp. 961–965, 2010.

[6] A. Schonberger, S. Virtanen, V. Giese, H. Schrottner, C. Spieberger, Nondestructive detection of corrosion applied to steel and galvanized steel coated with organic paints by the pulsed phase thermography, *Materials and Corrosion*, Vol. 63, pp. 195–199, 2012.

[7] K.E. Cramer, P.A. Howell, H.I. Syed, Quantitative thermal imaging of aircraft structures, *Proceedings of SPIE: Thermosense XVII*, pp. 226–232, 1995.

[8] Z. Liu, M. Genest, D. Krys, Processing thermography images for pitting corrosion quantification on small diameter ductile iron pipe, *NDT&E International*, Vol. 47, pp. 105–115, 2012.

[9] [V.P. Vavilov, E. Grintsato, P. Bizon, S. Marinetti, Detecting corrosion in steel products by dynamic infrared thermography, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 30, pp. 684–692, 1994.

[10] K.S. Hermanson, B.I. Sandor, Corrosion fatigue modelling via differential infrared thermography, *Experimental Techniques*, pp. 19–21, 1998.

[11] L. Chung, I.K. Paik, S.H. Cho, Y.S. Roh, Infrared thermographic technique to measure corrosion in reinforcing bar, *Key Engineering Materials*, pp. 321–323, 821–824, 2006.

[12] G. Shen, T. Li, Infrared thermography for high - temperature pressure pipe, *Insight*, Vol. 49, pp. 151–153, 2007.

[13] R.D. Hudson, *Infrared system engineering*. New York: Wiley- Intercedence, 1969.

[14] Nichols JT. *Temperature measuring*, US Patent 2,008,793, 1935.

[15] P. Vernotte, Mesure de la conductibilite thermique des isolants, *methodede toushau*, ChalInd, French, pp. 208:331-7, 1937.

[16] Beller WS. Navy sees promise in infrared thermography for solid case checking, *Missiles Rocket*, Vol. 22, pp. 41, 1965.

[17] P. Ghabezi, M. Farahani, A cohesive model with a multi-stage softening behavior to predict fracture in nano composite joints, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 219, pp. 106611, 2019.

[18] O. Sam-Daliri, L. Faller, M. Farahani, A. Roshanghias, A. Araee, M. Baniassadi, H. Zangl, Impedance analysis for condition monitoring of single lap CNT-epoxy adhesive joint. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 88, pp. 59-65, 2019.

[19] P. Ghabezi, M. Farahani, Characterization of cohesive model and bridging laws in mode I and II fracture in nano composite laminates, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, Vol. 12(4), pp. 4329-4355, 2018.

[20] D. Rahmatabadi , A. Shahmirzaloo, M. Farahani, M. Tayyebi, R. Hashemi, Characterizing the elastic and

[1] Deep Hole Drilling

plastic properties of the multilayered Al/Brass composite produced by ARB using DIC, *Materials Science and Engineering: A*, pp. 753, 70-78, 2019.

[21] N.M. Ramezani, B. Davoodi, M. Farahani, A.H. Khanli, Surface integrity of metal matrix nanocomposite produced by friction stir processing (FSP), *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 41(11), pp. 503-512, 2019.

[22] Zhi Zeng, Chunguang Li, Ning Tao, Lichun Feng, Cunlin Zhang, Depth prediction of non-air interface defect using pulsed thermography, *NDT & E International*, Vol. 48, pp. 39-45, 2012.

[23] P. Ghabezi, M. Farahani, A. Shahmirzaloo, Ghorbani, H, N.M. Harrison, Defect evaluation of the honeycomb structures formed during the drilling process, *International Journal of Damage Mechanics*, published online, 2019.

[24] A. Ahmady, M. Farahani, A. Ardebili, Non-destructive evaluation of defects in sheets of low carbon steel in pulsed thermography method, *The 5th Iranian International NDT Conference*, Olympic Hotel, Tehran, Iran, November 4-5, 2018.

[25] A. Ahmady, M. Farahani, A. Ardebili, The effect of material on defect detect of metal sheets by pulsed thermography, *The 5th Iranian International NDT Conference*, Olympic Hotel, Tehran, Iran, November 4-5, 2018.