

การศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าว ณ ขอบรูเจาะต่อความไว
ในการทดสอบด้วยวิธีกระแสไหลวนสำหรับงานซ่อมบำรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรกล
Study of Cracking Behavior of a Drilled Hole Edge Crack on ECT Sensitivity
for Machinery Component Maintenance

ฤทธิชัย เภาเนียม¹ สมชาย วนไทยสงค์^{1*} กิจทวี นุรินรัมย์¹ และ เจษฎา แก้ววิชิต²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ พุุมหามาเมฆ สาทร กรุงเทพฯ 10120

²สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

450 หมู่ 6 ตำบลย่านยาว อำเภอสามชูก จังหวัดสุพรรณบุรี 72130

Rittichai Phaoniam¹, Somchai Wonthaisong^{1*} Kittawee Nurinram¹ and Jesada Kaewwichit²

¹Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Krungthep,

2 Nanglinchi Road, Thungmahamek, Sathorn, Bangkok, 10120

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Technical Education,

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi,

450 Moo 6, Yan Yao, Sam Chuk, Suphan Buri, 72130

Corresponding author Email: Somchai.wo@mail.rmutk.ac.th*

(Received: January 16, 2023; Revised: June 7, 2023; Accepted: June 8, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของรอยแตกร้าวรอยเชื่อม ณ ขอบรูเจาะต่อความสามารถในการทดสอบด้วยวิธีกระแสไหลวนสำหรับงานซ่อมบำรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โดยการสร้างรอยแตกร้าวบนรอยเชื่อมบริเวณขอบรูเจาะชิ้นส่วนประกอบของเครื่องจักรกลที่ผลิตจากเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด SKD11 ซึ่งทำการทดลองด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลส ปกคลุม (Tungsten Inert Gas welding : TIG) ในลักษณะการเชื่อมจุดพร้อมกับชุดจำลองความเค้นตกค้าง (U-Bending Type) ซึ่งพิจารณาจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการแตกร้าวในรอยเชื่อม คือ ระดับความเค้นตกค้าง 154 และ 220 เมกะปาสคาล และเวลาเชื่อม 3 และ 6 วินาที จากนั้นทำการตรวจสอบรอยแตกร้าวรอยเชื่อมด้วยสารแทรกซึมและวิธีกระแสไหลวน ผลการทดลองพบว่ารอยแตกร้าวเกิดขึ้นทุกสภาวะการเชื่อมจากการแสดงผลการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึมอย่างชัดเจน ความลึกรอยแตกร้าวรอยเชื่อมถูกประเมินผลด้วยการตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวนมีค่าแนวโน้มที่สูงขึ้นเท่ากับ 1.08 มม. เมื่อใช้ระดับความเค้นตกค้าง 220 เมกะปาสคาล และเวลาเชื่อม 6 วินาที ซึ่งตรวจพบลักษณะสัญญาณแอมพลิจูดมีความใกล้เคียงกับสัญญาณจากแท่งมาตรฐานอ้างอิงของร่องความลึกรอยบกพร่องต้นแบบ (Reference Standard Block) ของชิ้นงานเชื่อม

คำสำคัญ: รอยแตกร้าวรอยเชื่อม กระแสไหลวน ความลึกรอยแตกร้าว ความเค้นตกค้าง

Abstract

The purpose of this research for studying a weld crack, which is adjacent to a drilled hole edge on machinery component maintenance, as well as, inspection sensitivity of eddy current testing. For the weld cracking-drilled hole edge of was constructed using tungsten inert gas welding process (TIG). SKD11 tool steel's machinery component was employed. The weld characteristic was the spot welding by U-Bending type simulation which was considered the factors affected to cracking in a weld such as residual stress levels of 154 and 220 MPa, and welding times of 3 and 6 seconds. Then, investigating the weld cracking used penetrant testing and eddy-current testing methods. The results were found that the weld cracking occurred obviously in entire experimental conditions. The penetrant testing was used in order to identify the cracking appearance. The weld cracking depth was assessed with eddy-current testing. There was the high tendency of approximately 1.08 mm in depth. Such the cracks were carried out by using the residual stress of 220 MPa, and welding time of 6 second. The eddy-current testing detected the amplitude signal of weld cracks was similar to a reference standard block of welded part.

Keywords: Weld cracking, Eddy-current testing, Crack depth, Residual stress

1. บทนำ

การแข่งขันในภาคส่วนอุตสาหกรรมการผลิตในปัจจุบันมีแนวโน้มที่สูงขึ้น เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อากาศยาน เรือ ขนส่งสินค้า โครงสร้างเหล็ก และอื่นๆ ซึ่งมีการพัฒนาและการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องในหลายๆ ด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุตสาหกรรมยานยนต์สมัยใหม่ที่มุ่งเน้นในด้านภาคการผลิตที่มีประสิทธิภาพ [1-3] ดังนั้น การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจึงเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะสามารถบ่งบอกถึงคุณภาพและอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ซึ่งสามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นตามมาจากการเสื่อมสภาพการใช้งานเป็นเวลานานของชิ้นส่วนต่างๆ [4-7] การประเมินการใช้งานถูกนำมากำหนดอายุการใช้งานเครื่องจักร และวางแผนการดำเนินงานด้านความปลอดภัยซึ่งนำไปสู่กระบวนการซ่อมบำรุงที่ถูกชี้วัดให้เป็นผลลัพธ์ และสามารถป้องกันความเสียหายที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้โดยวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive testing : NDT) เช่น การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม (Penetrant testing : PT) การตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน (Eddy-current testing : ECT) และอื่นๆ ซึ่งเป็นวิธีที่มีความสำคัญในกระบวนการตรวจสอบความไม่ต่อเนื่องของวัสดุที่ถูกใช้กันอย่างกว้างขวาง และเหมาะสมสำหรับงานประเภทโลหะบาง ท่อ โครงสร้าง และงานเชื่อม เป็นต้น [8-10]

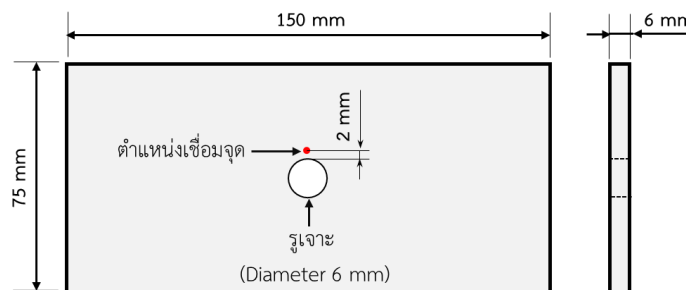
จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ Ehsan Mohseni และคณะ ได้ทำการตรวจสอบระดับของสัญญาณที่ถูกรบกวนในแต่ละเทคนิคซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดผลกระทบของการวางแนวรอยแตกร้าวด้วยสัญญาณแอมพลิจูดด้วยการทดสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน (ECT) พบว่าผลการทดลองเปรียบเทียบกับค่าจำลองสัญญาณความน่าจะเป็น และระบบอัตโนมัติมีความสอดคล้องกันและมีความน่าเชื่อถือในการตรวจสอบด้วยวิธี ECT [11] สัญญาณแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นตามขนาดความลึกของร่องรอยบาก และเส้นโค้งที่แสดงถึงความแปรผันของแอมพลิจูดเทียบกับความลึกสามารถใช้เป็นมาตรฐานในการหาขนาดของความลึกของรอยแตกจริงได้ [12] และชนิดของหัวโพรบแบบกระแสสมำเสมอมีลักษณะของสัญญาณอิมพีแดนซ์ขนาดใหญ่กว่า

สัญญาณของแบบจำลองทางตัวเลขเล็กน้อย ซึ่งสามารถใช้ตรวจสอบรอยแตกกว้างของรอยเชื่อมอินโคเนล (Inconel) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [13] อย่างไรก็ตามการสร้างรอยบกพร่องเทียมเพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการจำลองสัญญาณเชิงตัวเลขของการทดสอบกระแสไหลวน (ECT) นั้น ได้ถูกวิจัยกันอย่างแพร่หลายในงานที่เกี่ยวข้อง แต่การสร้างรอยแตกกว้างต้นแบบที่ถูกจำลองสถานการณ์จากสภาวะการใช้งานจริง พบว่ามีการศึกษาค่อนข้างน้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่งปัจจัยกระตุ้นที่ส่งผลกระทบต่อรอยแตกกว้างรอยเชื่อมเพื่อนำมาใช้สำหรับฝึกทักษะการประเมินความเสียหายในกระบวนการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรกลหรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมรอยแตกกว้างบริเวณขอบรูเจาะโดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีดคลูม (TIG) สำหรับวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด SKD11 ด้วยปัจจัยของระดับความเค้นตกค้างและเวลาเชื่อมที่แตกต่างกัน ตรวจสอบรอยแตกกว้างด้วยสารแทรกซึม (PT) และวิธีการกระแสไหลวน (ECT) เพื่อประเมินลักษณะรอยแตกกว้างที่เกิดขึ้นในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง และสามารถนำไปปรับใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องต่อไป

2. เครื่องมือและอุปกรณ์

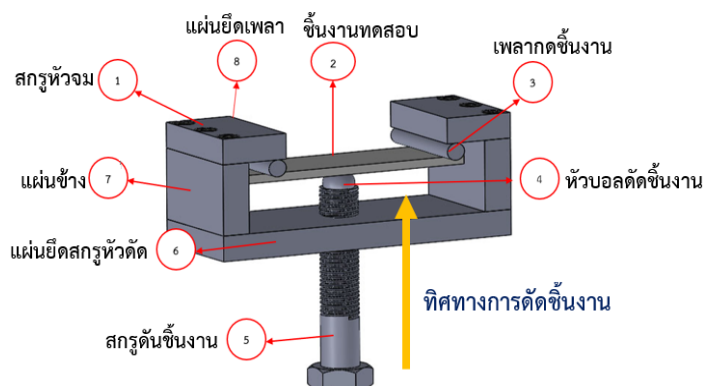
1) วัสดุทดลอง คือ เหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด SKD11 ขนาดความกว้าง 75 มม. ความยาว 150 มม. และความหนา 6 มม. โดยชิ้นงานทดลองถูกเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. บริเวณกลางแผ่นชิ้นงานทดสอบ และกำหนดตำแหน่งการเชื่อมจุดห่างจากขอบรูเจาะ 2 มม. ตามแนวความกว้างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขนาดชิ้นงานทดลอง

2) ชุดทดสอบจำลองความเค้นตกค้าง (U-Bending Type)

ออกแบบชุดทดสอบจำลองความเค้นตกค้าง (U-Bending Type) ให้เป็นไปตามหลักการกำหนดแรงที่กระทำกับชิ้นงานทั้ง 2 ข้าง ด้วยเพลาคดชิ้นงานที่ถูกให้แรงดัดชิ้นงานอยู่ในทิศทางตรงกันข้าม แสดงส่วนประกอบของชุดทดสอบแบบ U-Bending Type และลักษณะการจับยึดชิ้นงานทดสอบดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ชุดทดสอบจำลองความเค้นตกค้าง (U-Bending Type)

3) เครื่องเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสตีล (TIG Welding Machine)

กระบวนการเชื่อมเป็นแบบอาร์คใช้แท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลสในการอาร์ค หรือเรียกว่าการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas welding : TIG) ด้วยเครื่องเชื่อม TIG รุ่น HITRONIC TIG 200S

4) อุปกรณ์ทดสอบรอยแตกด้วยสารแทรกซึม

การตรวจสอบรอยแตกด้วยสารแทรกซึม (Penetrant Testing : PT) ใช้ยาทั้งหมด 3 ประเภท ได้แก่ 1) น้ำยาทำความสะอาดพื้นผิว (Cleaner), 2) น้ำยาแทรกซึมชนิดมองเห็นด้วยตาเปล่า (Color Contrast Penetrant), 3) น้ำยาส่งภาพ (Developer) และ ชุดอุปกรณ์ทำความสะอาดชิ้นงานตั้งแต่การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ขณะทำการตรวจสอบ และสิ้นสุดขั้นตอนการทดสอบ

5) เครื่องตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน (Eddy-current testing : ECT) รุ่น Mentor EM Eddy Current เชื่อมต่อกับสายเคเบิล RG 174 ROHS และหัวโพรบสำหรับสแกนพื้นผิวในช่วงความถี่ 25-100 kHz แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เครื่องตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน

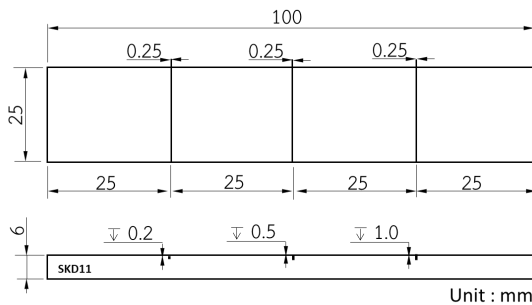
3. การทดลอง

3.1 แท่งมาตรฐานอ้างอิงร่องความลึกรอยบกพร่องต้นแบบ (Reference Standard Block) และการตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน

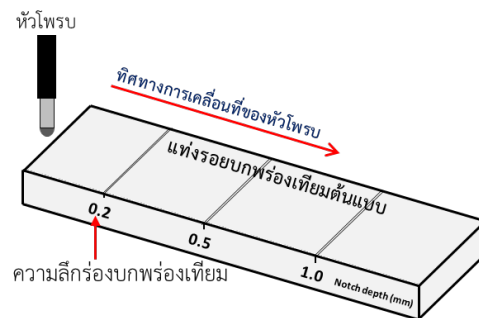
การสร้างแท่งร่องความลึกรอยบกพร่องต้นแบบสำหรับใช้อ้างอิงลักษณะของสัญญาณแอมพลิจูดที่ตรวจพบในรอยแตกร้าวรอยเชื่อมเป็นไปตามมาตรฐาน ASME SEC.V ARTICLE 8 [14] ซึ่งถูกกำหนดด้วยวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด SKD11 ที่ไม่ผ่านการเชื่อม และผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas welding: TIG) มีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

1) ออกแบบแท่งมาตรฐานอ้างอิงร่องความลึกรอยบกพร่องต้นแบบ (Reference Standard Block) หรือ แท่งสอบเทียบ (Calibrate) ถูกกำหนดขนาดตามแท่งมาตรฐานรอยบกพร่องเทียบจากต่างประเทศที่ระดับความลึก 0.2, 0.5 และ 1.0 มม แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4

2) การตรวจสอบรอยแตกร้าวด้วยวิธีกระแสไหลวน (ECT) ซึ่งกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของหัวโพรบตั้งฉากกับร่องความลึกรอยบกพร่อง แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 ขนาดแท่งมาตรฐานอ้างอิงร่องความลึก
รอยบกพร่องต้นแบบ
(Reference Standard Block)



รูปที่ 5 ลักษณะการตรวจสอบรอยแตกร้าว
ด้วยวิธีกระแสไหลวน (ECT)

การดำเนินงานตามเทคนิคการปรับตั้งค่ารอยความไม่ต่อเนื่องอ้างอิงตาม ASME SEC.V ARTICLE 8 โดยปรับตั้งเส้นยกออก (Lift off) ให้อยู่ในแนวแกนแนวตั้ง หรือแกนแนวนอน ซึ่งการตอบสนองต่อสัญญาณที่บกพร่อง โดยการควบคุมการเพิ่มขึ้นของสัญญาณบกพร่องจากจุดที่ลึกที่สุดเป็นอย่างน้อย 50% ของจอแสดงผลทางแนวตั้ง หรือแนวนอน แสดงเงื่อนไขและการปรับตั้งค่าเครื่องตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวนดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขและการปรับตั้งค่าเครื่องตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน

หัวตรวจสอบ (Probe)	
ชนิดหัวตรวจสอบ (Probe Type)	Surface Probe
ลักษณะขดลวด (Coil Type)	Absolute
ขนาดหัวตรวจสอบ (Probe Dai.), mm	3.2
สายเชื่อมต่อ (Cable Type)	Microdot to BNC
ช่วงความถี่ใช้งาน (Frequency Range), kHz	20-200
การปรับตั้งเครื่องตรวจสอบ (ECT Set up)	
โหมดทำงาน (Mode)	Phase Mode
ความถี่ใช้งาน (Operating Frequency), kHz	200
กำลังขยาย (X/Y dB Gain)	26.7/26.7
ปรับตั้งมุมเฟส (Phase, deg.)	279.4
อัตราสุ่มสัญญาณ (Sample Rate), kHz	1000

3.2 เงื่อนไขการทดลองเพื่อสร้างรอยแตกจำลอง

1) คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด SKD11 โดยมุ่งเน้นที่ความเค้นตกค้าง ณ จุดครากของวัสดุเพื่อกำหนดเงื่อนไขของวัสดุดังกล่าว แสดงค่าความเค้นตกค้าง ณ จุดครากของเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด SKD11 มีค่า 154 MPa และแสดงคุณสมบัติอื่นๆ [15] ดังตารางที่ 2

วัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด SKD11 ถูกกำหนดเป็นเกณฑ์ในการจำลองค่าความเค้นตกค้างที่ปริมาณ 154 และ 220 MPa เพื่อหาแรงกระทำสูงสุด และระยะดัดที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละปริมาณความเค้นที่ได้จากการคำนวณตามกลศาสตร์วัสดุความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและระยะดัด แสดงผลการจำลองแรงและระยะดัดที่เปลี่ยนแปลงในระดับความเค้นตกค้าง 154 และ 220 MPa ใช้แรงกระทำสูงสุด 535 และ 770 นิวตัน มีระยะดัดเท่ากับ 0.5 และ 2.0 มม. ตามลำดับ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด SKD11 [15]

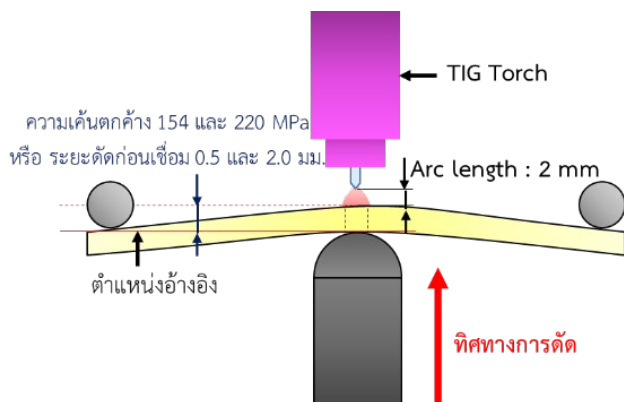
เงื่อนไข	รายละเอียด
Yield strength	154 MPa
Tensile strength	231 MPa
Elongation	56 %
HBS	123-321

ตารางที่ 3 ผลการจำลองแรงกระทำในแต่ละระดับความเค้นตกค้างของเหล็กกล้า เกรด SKD11

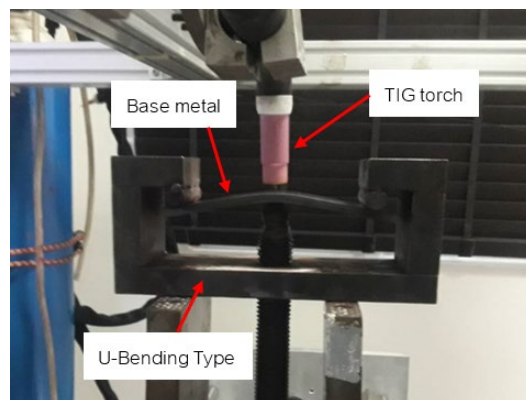
ความเค้นตกค้าง	แรงกระทำ	ระยะดัดเปลี่ยนแปลง
154 MPa	535 N	0.5 mm
220 MPa	770 N	2.0 mm

2) จับยึดชิ้นงานทดสอบบนชุดทดสอบ U-Bending Type โดยทำการดัดชิ้นงานในระยะดัด 0.5 และ 2.0 มม. หรือความเค้นตกค้าง 154 และ 220 MPa และเชื่อมจุดในตำแหน่งที่ห่างจากขอบระยะ 2 มม. (รูปที่ 1) แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการ

ทดลองดังตารางที่ 4 และลักษณะการเชื่อมดังรูปที่ 6



(ก) การตั้งค่าเงื่อนไขการเชื่อม



(ข) การสร้างความเค้นตกค้างขณะเชื่อม

รูปที่ 6 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

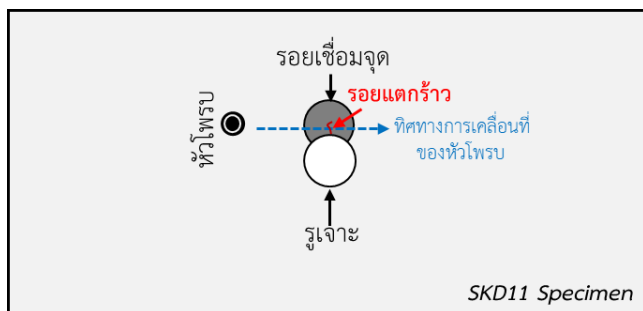
ตารางที่ 4 เงื่อนไขการเชื่อม

เงื่อนไข	รายละเอียด
กระบวนการเชื่อม	GTAW
ทิศทางในการเชื่อม	แบบจุด
กระแสเชื่อม	100 Amps
แท่งอิเล็กโทรด	WT20, 2.4 มม.
ระยะอาร์ค	2 มม.
แก๊สปกคลุม	99.9% argon
อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม	10 L/min
เวลาเชื่อมจุด	3 และ 6 วินาที
ความเค้นตกค้าง หรือ ระยะตัดที่เปลี่ยนไป	154 และ 220 MPa หรือ 0.5 และ 2.0 มม.

3) การตรวจสอบรอยแตกร้าวรอยเชื่อมด้วยสารแทรกซึม (Penetrant Testing : PT) และวิธีกระแสไหลวน (Eddy-current testing : ECT)

การทดสอบรอยแตกร้าวด้วยสารแทรกซึม (PT) มีขั้นตอน ดังนี้ 1) ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยน้ำยาทำความสะอาดพื้นผิวโดยใช้ผ้าแห้งเช็ดออก, 2) ฉีดน้ำยาแทรกซึมลงบนชิ้นงาน ปล่อยทิ้งไว้ 5 นาที, 3) ใช้น้ำยาทำความสะอาดผิวงานโดยฉีดใส่ผ้าแห้งแล้วเช็ดน้ำยาแทรกซึมบนผิวงานให้สะอาด, 4) ฉีดน้ำยาแรงปฏิกิริยาแล้วปล่อยทิ้งไว้ 10 นาที และ 5) บันทึกผลการตรวจสอบก่อนใช้น้ำยาทำความสะอาดพื้นผิวเพื่อทำความสะอาดผิวชิ้นงาน

การตรวจสอบรอยแตกร้าวด้วยวิธีกระแสไหลวน (ECT) ดำเนินการตามเทคนิคการปรับตั้งค่าเครื่องทดสอบและพารามิเตอร์ต่างๆ ตามขั้นตอนในการทดสอบของแท่งร่องความถี่รอบยกพร้อมต้นแบบ (ข้อ 3.1) แสดงตำแหน่งการตรวจสอบสัญญาณของชิ้นงานทดสอบหลังเชื่อมบริเวณรอยเชื่อมดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ตำแหน่งการตรวจสอบรอยแตกร้าว (Crack)

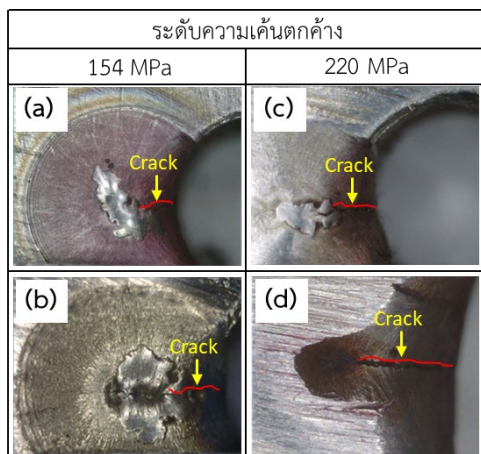
4) การวัดความยาวรอยแตกร้าวถูกวัดจากตำแหน่งเริ่มต้นถึงจุดสิ้นสุดของรอยแตกร้าว หลังจากการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม (PT) โดยถ่ายภาพของรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนิกส์ (USB Digital Microscope Endoscope Otopscope Camera) ก่อนนำภาพถ่ายเข้าสู่โปรแกรมการวัดขนาดความยาวรอยแตกร้าว (Crack length)

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

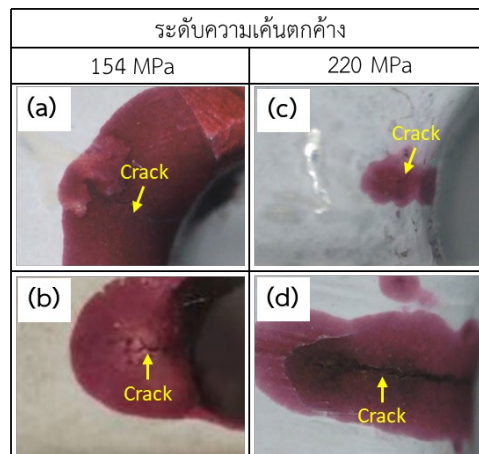
จากผลการคำนวณระดับค่าความเค้นตกค้าง (Stress) ของวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด SKD11 เพื่อหาระยะตัดที่เปลี่ยนไปของชิ้นงานทดสอบขณะทำการเชื่อมจุด โดยถูกกำหนดระดับค่าความเค้นตกค้าง 154 และ 220 MPa, เวลาเชื่อม 3 และ 6 วินาที แสดงผลการทดลอง ดังนี้

4.1 ผลการตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยสารแทรกซึม (Penetrant Testing : PT)

รูปที่ 8 แสดงรอยเชื่อมและลักษณะรอยแตกร้าวของการเชื่อมจุดใกล้ขอบรูเจาะที่ระดับความเค้นตกค้าง 154 และ 220 MPa, เวลาเชื่อม 3 และ 6 วินาที พบว่าทุกเงื่อนไขการทดลองเกิดรอยแตกร้าวบนรอยเชื่อมที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าซึ่งมีขนาดความยาวที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามชิ้นงานทดสอบทั้งหมดถูกทำการตรวจสอบรอยแตกร้าวบนพื้นผิวรอยเชื่อมด้วยสารแทรกซึม (PT) เพื่อยืนยันการแตกร้าวของรอยเชื่อมแสดงลักษณะรอยแตกร้าวและสามารถวัดขนาดความยาวรอยแตกร้าวตามสารแทรกซึมที่ปรากฏขึ้นอย่างชัดเจนบนรอยเชื่อมจุดบริเวณขอบรูเจาะดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 ลักษณะรอยเชื่อมจุดที่เวลาในการเชื่อมและความเค้นตกค้างที่แตกต่างกัน ;
(a) 3 วินาที 154 MPa, (b) 6 วินาที 154 MPa,
(c) 3 วินาที 220 MPa และ (d) 6 วินาที 220 MPa



รูปที่ 9 รอยเชื่อมที่ถูกตรวจสอบด้วยสารแทรกซึมที่เวลาในการเชื่อมและความเค้นตกค้างที่แตกต่างกัน ;
(a) 3 วินาที 154 MPa, (b) 6 วินาที 154 MPa,
(c) 3 วินาที 220 MPa และ (d) 6 วินาที 220 MPa

ตารางที่ 5 ผลการวัดค่าความยาวรอยแตกร้าวรอยเชื่อม

ความเค้นตกค้าง (MPa)	เวลาเชื่อม (วินาที)	ความยาวรอยแตกร้าว (มม.)
154	3	0.94
	6	2.13
220	3	1.16
	6	2.31

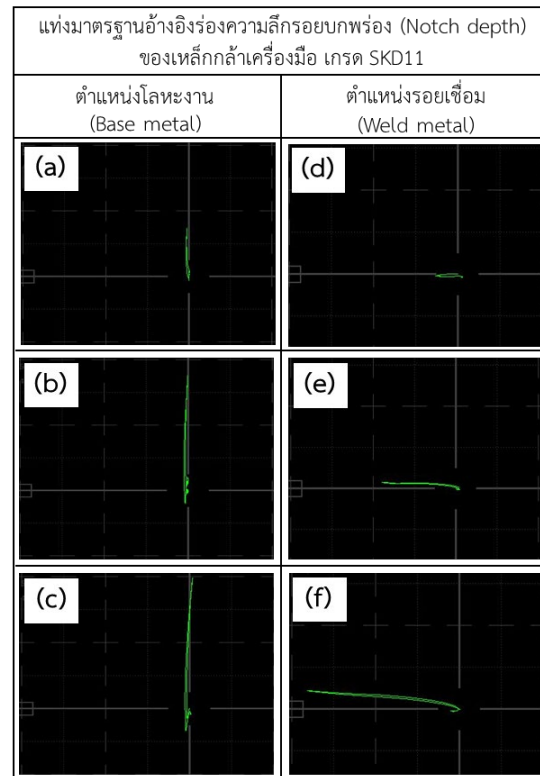
ตารางที่ 5 แสดงผลค่าความยาวรอยแตกร้าวรอยเชื่อม ที่ระดับความเค้นตกค้าง 154 MPa และเวลาเชื่อม 3 และ 6 วินาที มีค่าเท่ากับ 0.94 และ 2.13 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับระดับความเค้นตกค้าง 220 MPa และเวลาเชื่อมเดียวกัน พบว่ารอยแตกร้าวมีความยาวเพิ่มขึ้นเป็น 1.16 และ 2.31 มม. ตามลำดับ นั้นแสดงให้เห็นว่าระดับความเค้นตกค้าง และเวลาเชื่อมที่เพิ่มขึ้นมีอิทธิพลต่อการเกิดรอยแตกร้าวในรอยเชื่อมจากการประเมินผลด้วยเทคนิคการตรวจสอบรอยแตกร้าวด้วยสารแทรกซึม (PT)

4.2 ผลการตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน (Eddy-current testing : ECT)

การหาความลึกรอยบกพร่องถูกตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน (ECT) เพื่อประเมินผลจากลักษณะของสัญญาณแอมพลิจูดที่ปรากฏขึ้น โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับร่องความลึกรอยบกพร่องต้นแบบจากวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด SKD11 (ชิ้นงานปกติที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม หรือตำแหน่งโลหะงาน) และชิ้นงานรอยเชื่อมหรือตำแหน่งรอยเชื่อมที่ระดับความลึก 0.2, 0.5 และ 1.0 มม. ตามลำดับ

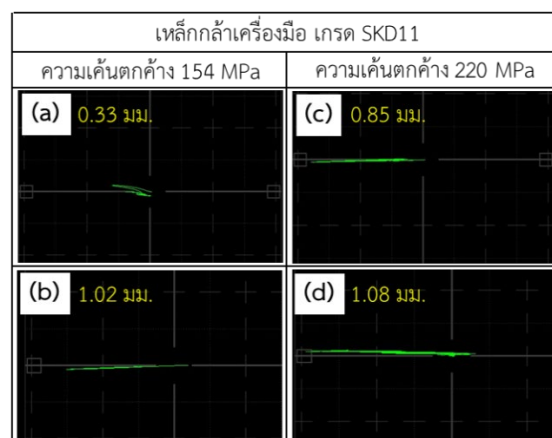
รูปที่ 10 แสดงลักษณะสัญญาณแอมพลิจูดของชิ้นงานปกติมีทิศทางไปในแนวแกน Y หรือมุมเฟสล่าช้า (Lag Phase) 90 องศา และมีความยาวสูงขึ้นเมื่อร่องความลึกรอยบกพร่องมีความลึกเพิ่มจาก 0.2 – 1.0 มม. ตามลำดับ ซึ่งมีทิศทางของเส้นสัญญาณแอมพลิจูดที่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานรอยเชื่อมที่มีระดับร่องความลึกเดียวกัน คือ สัญญาณแอมพลิจูดมีทิศทางไปในแนวแกน X ทางด้านขวา หรือมุมเฟสล่าช้า 180 องศา แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานปกติที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม และ

ชิ้นงานเชื่อมมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าชิ้นงานรอยเชื่อมเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคจากอิทธิพลทางความร้อนซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุจึงส่งผลกระทบต่อสัญญาณแอมพลิจูดที่มีทิศทางเปลี่ยนไป [16]



รูปที่ 10 สัญญาณแอมพลิจูดของแท่งมาตรฐานอ้างอิงร่องความลึกรอยบากพร้อมต้นแบบ

ที่ตำแหน่งโลหะงานและตำแหน่งรอยเชื่อม ; (a) 0.2 มม., (b) 0.5 มม., (c) 1.0 มม., (d) 0.2 มม., (e) 0.5 มม. และ (f) 1.0 มม.



รูปที่ 11 สัญญาณแอมพลิจูดของความลึกรอยแตกที่ถูกรวบรวมที่เวลาในการเชื่อมและความเค้นตกค้างที่แตกต่างกัน ;

(a) 3 วินาที 154 MPa, (b) 6 วินาที 154 MPa, (C) 3 วินาที 220 MPa และ (d) 6 วินาที 220 MPa

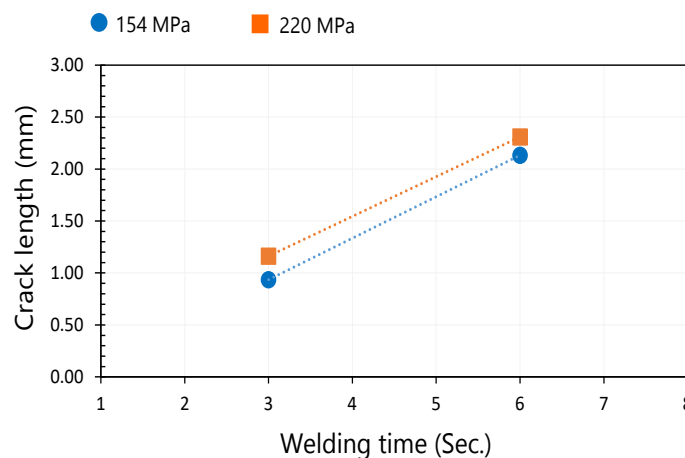
ตารางที่ 6 ผลการวัดค่าความยาวและความลึกรอยแตกร้าวรอยเชื่อม

ระดับความเค้นตกค้าง (MPa)	เวลาเชื่อม (วินาที)	รอยแตกร้าว	
		ความยาว (มม.)	ความลึก (มม.)
154	3	0.94	0.33
	6	2.13	1.02
220	3	1.16	0.85
	6	2.31	1.08

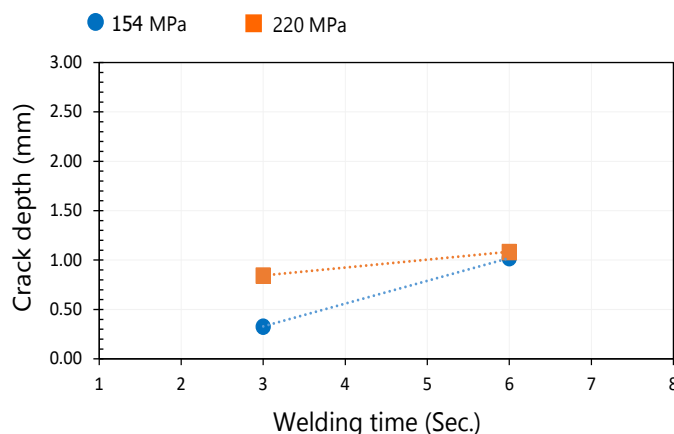
ผลการตรวจสอบรอยแตกร้าวรอยเชื่อมมีลักษณะสัญญาณคล้ายกับสัญญาณแอมพลิจูดที่ถูกตรวจสอบในแท่งร่องความลึกรอยบกพร่องต้นแบบ (รูปที่ 10) และไม่พบลักษณะของสัญญาณที่แตกต่าง หรือเหมือนกับสัญญาณแอมพลิจูดของรอยเชื่อมที่เกิดรอยแตกร้าวขนาดใหญ่ในลักษณะความไม่ต่อเนื่องของเนื้อวัสดุแสดงลักษณะแอมพลิจูดของรอยเชื่อมดังรูปที่ 11 พบว่าที่ระดับความเค้นตกค้าง 154 MPa, เวลาเชื่อม 3 วินาที มีค่าความลึกรอยแตกร้าว 0.33 มม. และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อระดับความเค้นตกค้าง และเวลาเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 220 MPa และ 6 วินาที มีค่าความลึกรอยแตกร้าวสูงสุดเท่ากับ 1.08 มม. ซึ่งสอดคล้องกับค่าความยาวรอยแตกร้าวที่ถูกวัดด้วยภาพถ่ายทางกายภาพบนรอยเชื่อม แสดงผลค่าความยาวและความลึกรอยแตกร้าวที่ถูกเชื่อมจุดด้วยเงื่อนไขที่กำหนดดังตารางที่ 6

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเค้นและเวลาในการเชื่อมที่ส่งผลต่อรอยแตกร้าว

จากตารางที่ 6 แสดงผลค่าความยาวและความลึกรอยแตกร้าวในแต่ละสภาวะการทดลอง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยดังกล่าวได้ดังกราฟรูปที่ 12 และ 13 พบว่า ความสัมพันธ์เวลาเชื่อม (Welding time) ความยาวรอยแตกร้าว (Crack length) และความลึกรอยแตกร้าว (Crack depth) ของเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด SKD11 ที่เวลาเชื่อม (Welding time) เดียวกัน และระดับความเค้นตกค้าง 154 และ 220 MPa มีรอยแตกร้าวที่สามารถวัดขนาดความยาวและความลึกได้นั้นมีค่าสูงขึ้น เมื่อเวลาเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 3 วินาที เป็น 6 วินาที ที่ระดับความเค้นตกค้างต่างกัน (154 และ 220 MPa) สามารถเกิดรอยแตกร้าวบริเวณจุดเชื่อมที่มีแนวโน้มความยาว และความลึกรอยแตกร้าวสูงขึ้นอย่างชัดเจน จากปัจจัยของเวลาเชื่อมที่สูงขึ้นส่งผลต่อพฤติกรรมการสร้างบ่อหลอมละลายที่เกิดการหลอมซึมลึก (Deep penetration) เพิ่มขึ้นจึงเป็นสาเหตุการเกิดรอยแตกร้าวในรอยเชื่อมในขณะที่รอยเชื่อมแข็งตัว [17]



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเชื่อม (Welding time) และความยาวรอยแตกร้าว (Crack length)



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเชื่อม (Welding time) และความลึกรอยแตก (Crack depth)

แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของเวลาเชื่อมส่งผลต่อขนาดของรอยแตกที่รอยเชื่อมที่ความเค้นตกค้างแตกต่างกัน ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อรอยแตกที่สูงที่สุด คือ เวลาเชื่อม (Welding time) เมื่อเปรียบเทียบกับระดับความเค้นตกค้างที่ผ่านการเชื่อมจุด เพื่อให้เกิดความร้อนบริเวณรูเจาะของชิ้นงานซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการแตกร้าวรอยเชื่อมซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ S. H. Chen และ Morteza Taheri [18-19]

5. สรุป

- 1) การแตกร้าวรอยเชื่อมที่ข้อบกพร่องพบรอยแตกร้าวจากการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม (PT) ทุกเงื่อนไขการเชื่อมที่ถูกกำหนดด้วยระดับความเค้นตกค้าง และเวลาเชื่อมซึ่งวัดความยาวรอยแตกร้าวได้ 0.94-2.31 มม.
- 2) ความลึกรอยแตกร้าวรอยเชื่อมใช้วิธีตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน (ECT) มีลักษณะของสัญญาณอิมพีแดนซ์สอดคล้องกับสัญญาณของร่องความลึกรอยแตกพร้อมซึ่งมีค่าความลึก 0.33-1.08 มม.
- 3) การเพิ่มขึ้นของขนาดรอยแตกร้าวรอยเชื่อมขึ้นอยู่กับระดับความเค้นตกค้าง และเวลาเชื่อมที่เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Tharawetcharak, P. Jomthong, C. Pornsing and T. Thonglim, "The Competitive Situation Analysis of Thai Automotive-Part Manufacturers Under Asean Free Trade Area Agreement," *Naresuan University Engineering Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 73-82, 2017. (in Thai)
- [2] A. Chaemfa, "Automotive industry," *Industry Update*, GSB Research, pp. 1-6, 2019. (in Thai)
- [3] *Chulalongkorn University Intellectual Property Institute*, "Next Generation Automotive-Intellectual Property Innovation Driven Enterprise (IP IDE Center)" December, 2018.

- [4] N. D. Beskou, S. V. Tsinopoulos, and G. D. Hatzigeorgiou, “Fatigue Cracking Failure Criterion for Flexible Pavements Under Moving Vehicles,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 90, pp. 476–479, 2016.
- [5] Y. Yamashita and Y. Murakami, “Small Crack Growth Model from Low to Very High Cycle Fatigue Regime for Internal Fatigue Failure of High Strength Steel,” *International Journal of Fatigue*, vol. 93, pp. 406–414, 2016.
- [6] J. Hong, L. Jiang, X. Xu, And Y. Ma, “High Cycle Fatigue Failure with Radial Cracks in Gears of Aero-Engines,” *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 33, no. 10, pp. 2620–2632, 2020.
- [7] H. Ma, J. Zeng, R. Feng, X. Pang, Q. Wang, and B. Wen, “Review on Dynamics of Cracked Gear Systems,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 55, pp. 224–245, 2015.
- [8] A. Prateepasen, “Non-Destructive Testing in Welds and Researches.” *Chulalongkorn University Press*, Bangkok, Thailand, 2011.
- [9] Y. Kong, C. J. Bennett, and C. J. Hyde, “A Review of Non-Destructive Testing Techniques for The In-Situ Investigation of Fretting Fatigue Cracks,” *Materials & Design*, vol. 196, p. 109093, 2020.
- [10] J. R. Deepak, V. K. Bupesh Raja, D. Srikanth, H. Surendran, and M. M. Nickolas, “Non-Destructive Testing (NDT) Techniques for Low Carbon Steel Welded Joints: A Review and Experimental Study,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 3732–3737, 2021.
- [11] E. Mohseni, H. Habibzadeh Boukani, D. Ramos França, and M. Viens, “A Study of The Automated Eddy Current Detection of Cracks in Steel Plates,” *Journal of Non-Destructive Evaluation*, vol. 39, no. 1, 2019.
- [12] B. Helifa, A. Oulhadj, A. Benbelghit, I. K. Lefkaier, F. Boubenider, and D. Boutassouna, “Detection and Measurement of Surface Cracks in Ferromagnetic Materials Using Eddy Current Testing,” *NDT & E International*, vol. 39, no. 5, pp. 384–390, 2006.
- [13] N. Yusa, E. Machida, L. Janousek, M. Rebican, Z. Chen, and K. Miya, “Application of Eddy Current Inversion Technique to The Sizing of Defects in Inconel Welds with Rough Surfaces,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 235, no. 14, pp. 1469–1480, 2005.
- [14] 2021 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V: Non-Destructive Examination, (ASME SEC.V ARTICLE 8).
- [15] D. W. Tang, C. Y. Wang, Y. N. Hu, and Y. X. Song, “Constitutive Equation for Hardened SKD11 Steel at High Temperature and High Strain Rate Using the SHPB Technique,” *SPIE Proceedings*, 2009.
- [16] V. M. Silva, C. G. Camerini, J. M. Pardal, J. C. Blás, and G. R. Pereira, “Eddy Current Characterization of Cold-Worked AISI 321 Stainless Steel,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 395–401, 2018.

- [17] R. Phaoniam, P. Inprachong and J. Kaewwichit, “Evaluation of Weld Solidification Cracking Resistance Based on High Temperature Ductility Curve”, *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 8, no. 3, pp. 152-166, 2018. (in Thai)
- [18] S. H. Chen, R. T. Yeh, T. P. Cheng, and I. J. Yang, “Hydrogen Sulphide Stress Corrosion Cracking of Tig and Laser Welded 304 Stainless Steel,” *Corrosion Science*, vol. 36, no. 12, pp. 2029–2041, 1994.
- [19] M. Taheri, S. F. Kashani-Bozorg, V. V. Ramalingam, B. Babaei, and A. Halvae, “Effect Of Nd:YAG Pulsed-Laser Welding Parameters on Melting Rate of GTD-111 Superalloy Joint,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 30, no. 12, pp. 9108–9117, 2021.