

อิทธิพลของกระแสไฟเชื่อมต่อการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ในเหล็กกล้าไร้สนิม
AISI 304L จากการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สปกคลุม

Influence of Weld Current to Chromium Carbide Precipitation in Stainless Steel AISI 304L
as of Gas Tungsten Arc Welding

ตรีเนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ และ นครินทร์ ศรีสุวรรณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถ.พินุดสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

Email: trinet2518@hotmail.com, Nakarins@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจะศึกษาปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM G108-94 ซึ่งต้องคำนวณหาค่า Pa (โอกาสที่จะเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน) จากกราฟโพลาริเซชันที่มีความสัมพันธ์ต่อการเกิดสภาวะเซนซิไทเซชันขึ้นงานตัวอย่างเชื่อมด้วยวิธี Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) การทดสอบครั้งนี้จะปรับเทคนิคในการเชื่อมโดยการใช้อิเล็กโทรดทั้งสแตนเลสผสมทอเรียม 2% ลับมุมอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลส 30 และ 60 องศา นอกจากนี้จะปรับใช้กระแสไฟตรงต่อขั้วตรง (Direct Current Electrode Negative: DCEN) ที่ 60, 70, 80 และ 90 แอมแปร์ โดยใช้แก๊สอาร์กอน 97% เป็นแก๊สปกคลุมและใช้เป็น Backing Gas ผลการทดสอบพบว่าขึ้นงานเชื่อมตัวอย่างทั้งหมด มีค่า Pa มากกว่า 0.4 แสดงว่ามีโครเมียมคาร์ไบด์ตกตะกอนตามบริเวณขอบเกรนในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) เนื่องจากขึ้นงานได้รับความร้อนสูงจากการเชื่อมด้วยวิธี GTAW ซึ่งจะผ่าน

ช่วงอุณหภูมิวิกฤต (425-810 °C) โดยที่กระแสไฟเชื่อมต่ำๆ ค่า Pa จะต่ำกว่าที่กระแสไฟเชื่อมสูง

อย่างไรก็ตามที่กระแสไฟเชื่อม 90 แอมแปร์ แสดงค่า Pa น้อยที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิการเชื่อมในสภาวะนี้สูงกว่า 1100 °C จึงเกิดการสลายตัวของโครเมียมคาร์ไบด์ สำหรับขึ้นงานที่เชื่อมด้วยอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลส 30 องศา แสดงค่า Pa สูงกว่าที่ลับมุม 60 องศา เนื่องจากขนาดเปลวไฟเชื่อมจะแคบและให้ความร้อนสูงจากหัวอิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็กและมีมุมแหลม

Abstract

This research aims to investigate the amount of chromium carbide in stainless steel AISI 304L by electrochemical technique testing (ASTM G108-94 standard test). The Pa values (probability of intergranular corrosion) from polarization curve which corresponding to sensitization stage were calculated. The specimens were produced with Gas Tungsten Arc Welding: GTAW method. This testing

applied welding technique adjustment by using electrodes of Thoriated Tungsten 2%, by which Tungsten angles were milled at 30 and 60 degree. Whereas the weld current varied from the value of Direct Current Electrode Negative (DCEN): 60, 70, 80 and 90 ampere respectively (with Argon 97 % as MAW gas and backing gas) The results show that all specimens had the Pa value of more than 0.4, indicating that there were more precipitation of $Cr_{23}C_6$ in heat affected zone (HAZ). This is because the specimens received high temperature from mmmmmmmmmmm GTWA process which have passed the critical temperature (425-810 °C). At low DCEN weld current, the Pa values were lower than high DCEN weld current. However, the Pa value was lowest at DCEN 90 ampere because the temperature of welding in this condition was more than 1100 °C, which caused chromium carbide disintegration. Whereas, the specimen that welded as of Tungsten electrode: angles 30 degree presented the Pa value of higher than Tungsten electrode: angles 60 degree because the welding flame was narrow and gave the high temperature from the small and incisive angle of Tungsten electrode.

1. บทนำ

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steels) นับเป็นวัสดุที่ถูกนำไปใช้ อย่าง

แพร่หลาย เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีสมบัติที่ดีหลายประการ ในเรื่องของความแข็งแรง ความสวยงาม และความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistance) ซึ่งแม้จะอยู่ในน้ำหรือสารละลายที่มีความเป็นกรดเจือจาง หากเมื่อเทียบกับเหล็กธรรมดาซึ่งจะเกิดสนิมได้ง่ายและรวดเร็วกว่า อย่างไรก็ตามการนำเหล็กกล้าไร้สนิมไปใช้งานนั้น จำเป็นต้องมีการเชื่อมขึ้นงานเพื่อยึดชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ซึ่งการเลือกวิธีในการเชื่อมที่ถูกต้องนั้นมีความสำคัญเพราะจะทำให้ชิ้นงานมีความคุณภาพและสมบูรณ์พร้อมใช้งาน

การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุมเป็นที่วิธีการหนึ่งนิยมมากในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมในวงการอุตสาหกรรม เนื่องการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุมเป็นวิธีการเชื่อมที่ทำให้การหลอมละลายเป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยอาศัยความร้อนที่เกิดจากการอาร์กระหว่างลวดเชื่อมทั้งสแตนกับชิ้นงาน ซึ่งลวดเชื่อมอิเล็กโทรดทั้งสแตนจะไม่หลอมละลายกับชิ้นงาน⁽¹⁾ แต่ปัญหาหลักที่พบภายหลังการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมคือการเกิดการกัดกร่อนที่บริเวณขอบเกรน (Intergranular corrosion)⁽²⁾ ซึ่งสาเหตุเกิดจากชิ้นงานได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณวิกฤต (427 - 810 °C) คาร์บอนจะรวมตัวกับโครเมียมแล้วตกผลึกเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ (Chromium carbide) ตามขอบเกรนในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ส่งผลให้ปริมาณโครเมียมที่ทำหน้าที่สร้างฟิล์มปกป้อง (Passive Film) ในเนื้อเกรนมีน้อยลง จึงทำให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจึงลดลงด้วย

ในปี พ.ศ. 2552 นครินทร์ ศรีสุวรรณและคณะ⁽³⁾ ได้ทดลองหาวิธีการปรับปรุงคุณภาพงานเชื่อมวิธี Shielded Metal Arc Welding (SMAW) กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยตรวจสอบหาโอกาสการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone HAZ) ด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า: Electrochemical potentiokinetic reactivation (EPR) ซึ่งพบว่าเทคนิคดังกล่าวสามารถแสดงแนวโน้มการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรนและการเกิดการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนได้

ในงานวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟเชื่อมต่อการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม โดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า: EPR สำหรับอธิบายแนวโน้มการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรนบริเวณของชิ้นงานก่อนและหลังการเชื่อม พร้อมทั้งศึกษาโครงสร้างจุลภาคและมหภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304L ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละสภาวะการทดสอบ เพื่อสังเกตปริมาณของโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรนในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนซึ่งจะเป็นสาเหตุของการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular Corrosion) โดยผลการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการเลือกใช้อุปกรณ์และกระแสไฟเชื่อมที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการเชื่อมได้ต่อไปในอนาคต

- **ทฤษฎีและหลักการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding: GTAW)**

วิธีการเชื่อม Gas Tungsten Arc Welding ได้การรับรองจากสมาคมการเชื่อมของอเมริกา (American welding society) โดยนิยามการเชื่อมแบบนี้ว่า เป็นวิธีการเชื่อมที่ใช้ลวด Tungsten เป็นตัวอาร์กและใช้แก๊สเฉื่อยเป็นแก๊สปกคลุมแนวเชื่อม โดยชิ้นงานจะหลอมละลายด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นจากการอาร์กระหว่างลวดทังสเตน (Non-consumable Electrode) กับชิ้นงานเชื่อม ซึ่งการใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุมบริเวณเชื่อมและบ่อหลอมละลายนั้น ทำเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกเข้ามาทำปฏิกิริยากับชิ้นงานบริเวณเชื่อมหนึ่ง ความร้อนที่ได้จากการอาร์กในขณะที่เชื่อมจะสูงประมาณ 1942 °C ซึ่งลวดทังสเตนจะทำหน้าที่อาร์กเพื่อให้เกิดความร้อนเท่านั้น จึงไม่จำเป็นต้องมีการเติมลวดเชื่อมลงในแนวเชื่อม

การเชื่อมแบบ GTAW หรือ TIG เป็นกรรมวิธีเชื่อมที่สามารถเชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิด ซึ่งรวมถึงโลหะผสม เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิม อะลูมิเนียมผสม หรือทองแดง เป็นต้น สำหรับตะกั่วและสังกะสีไม่แนะนำให้เชื่อมแบบ GTAW เนื่องจากวัสดุทั้งสองมีจุดหลอมต่ำ จึงมีอุณหภูมิที่แตกต่างกับอุณหภูมิของเปลวอาร์กค่อนข้างมาก อีกทั้งเนื้อวัสดุดังกล่าวเมื่อหลอมแล้วจะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอส่วนโลหะที่มีจุดหลอมสูงสามารถเชื่อมแบบ GTAW ได้ดี

- **การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macro Structure)**

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนี้ เป็นการตรวจสอบโครงสร้างด้วยการมองด้วยตาเปล่า ซึ่งการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนั้นไม่ยุ่งยากมาก ทั้งนี้การตรวจสอบโครงสร้าง

ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและจุดประสงค์ของการตรวจสอบด้วย เช่น การตรวจสอบเพื่อดูการแยกชั้นของผลึก ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม ทารุพูนภายในเนื้อโลหะ ตรวจสอบหารอยร้าว หรือสังเกตลักษณะความเสียหายที่หน้าตัดที่ถูกดึงจนขาด เป็นต้น ซึ่งในการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนิยมใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายไม่เกิน 10 X (ขยาย 100 เท่า)

● **การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Micro Structure)**

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค กระทำได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง ถ้าเป็นกล้องที่ใช้แสงจากหลอดไฟจะให้กำลังขยายไม่เกิน 200 X (ขยาย 2,000 เท่า) ส่วนกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนจะสามารถให้กำลังขยายได้สูงถึง 10,000 X (ขยาย 100,000 เท่า) หรือมากกว่านี้ ซึ่งจะให้ภาพที่มีความละเอียดและคมชัดมาก อย่างไรก็ตามการตรวจสอบประเภทนี้จะมีวิธีการเตรียมชิ้นงานที่ซับซ้อนกว่าการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบทั่วไป

● **เทคนิคเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Potentiokinetic Reactivation: EPR)⁽⁴⁾**

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์หาการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนของชิ้นงานโลหะ โดยเฉพาะชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม ที่บริเวณขอบเกรนมักจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนในขั้นตอนการเชื่อม โดยชิ้นงานเชื่อมเป็นชิ้นทำงาน: Working Electrode (WE) ใช้ขั้ว Ag/AgCl เป็นขั้วอ้างอิงมาตรฐาน: Standard Reference electrode (RE) และใช้แท่งแพทตินัมเป็นขั้ว Counter electrode (CE) ซึ่งโดยขั้วทั้งสามจะแช่อยู่ในสารละลาย 0.5 M H₂SO₄ ผสมกับ

0.01 M KSCN และ ฟังก์ชันไนโตรเจนเพื่อไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากสารละลาย ก่อนการทดสอบ 30 นาที ตามรูปที่ 1

จากนั้นจึงทดสอบด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า: EPRตามมาตรฐาน ASTM G108-94 ซึ่งจะป้อนค่าศักย์ไฟฟ้าจากเครื่อง Potentio / Galvanostat จากจุดที่ชิ้นงานมี Passive Film ถอยหลังเข้าสู่ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และติดตามวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป (Polarization curve) เพื่อตรวจสอบหาโอกาสที่จะเกิดสภาวะ Sensitization ของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยจะคำนวณจากค่า Pa ตามสมการที่ 1

$$Pa = Q / X \tag{1}$$

โดย Pa = โอกาสที่จะเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน

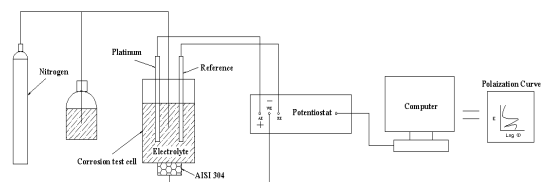
$$X = A_s [5.1 \times (10^{-3}) \times e^{0.35 \times G}]$$

A_s = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน หน่วย ตารางเซนติเมตร

Q = พื้นที่ใต้ Reactivation Peak หน่วย คูลอมป์

G = ขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM E112-63

หากค่า Pa ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า 0.4 แสดงว่ามีโอกาสที่โครเมียมคาร์ไบด์จะตกตะกอนบริเวณ HAZ ขึ้นได้สูง แต่ถ้าค่า Pa มีค่าน้อยกว่า 0.1 แสดงว่าไม่มีเกิดการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ในบริเวณแนวเชื่อม



รูปที่ 1 รูปแบบการติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับทดสอบหาการเกิดสภาวะ Sensitization ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 การหาองค์ประกอบทางเคมี

1. นำชิ้นงานไปทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง Emission spectrometer เพื่อตรวจสอบคุณภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 โดยแสดงปริมาณธาตุ ดังตารางที่ 1

2. ตัดชิ้นงานตัวอย่าง ขนาด 50×100 มิลลิเมตร (ความหนา 3 มิลลิเมตร) จำนวนอย่างละ 32 ชิ้น พร้อมทั้งทำการลบมุมชิ้นงานด้วยตะไบ และทำความสะอาดผิวด้านหน้าที่จะทำการเชื่อมด้วยแปรงลวด

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 L

C	Cr	Ni	Mn	Si	P	Mo	Cu	Fe
0.03	17.6	8.14	1.61	0.43	0.02	0.07	0.10	Bal.

2.2 การเชื่อมชิ้นงานด้วยวิธี GTAW

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรและสภาวะการทดสอบต่างๆ ในการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสปีคคูลม

เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L	พารามิเตอร์สำหรับกระบวนการเชื่อม Gas Tungsten Arc Welding						
	กระแสเชื่อม (Amp)	แรงดันอาร์ก (V)	ความเร็วการเชื่อม (S / m)	ขนาดอิเล็กโทรดทั้งสแตน \varnothing	แก๊สปกคลุม Ar 97%+H 3% (L / min)	Backing Gas Ar 97% (L / min)	มุมในการลับอิเล็กโทรด(องศา)
ชุดที่ 1	60	10	3.55	EWTh-2 2.4	10	6 ± 1.0	30
ชุดที่ 2	70	10	3.43	EWTh-2 2.4	10	6 ± 1.0	30
ชุดที่ 3	80	10	3.04	EWTh-2 2.4	10	6 ± 1.0	30
ชุดที่ 4	90	10	2.46	EWTh-2 2.4	10	6 ± 1.0	30
ชุดที่ 5	60	10	3.46	EWTh-2 2.4	10	6 ± 1.0	60
ชุดที่ 6	70	10	3.21	EWTh-2 2.4	10	6 ± 1.0	60
ชุดที่ 7	80	10	2.58	EWTh-2 2.4	10	6 ± 1.0	60
ชุดที่ 8	90	10	2.49	EWTh-2 2.4	10	6 ± 1.0	60

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสปีคคูลม (Gas Tungsten Arc Welding: GTAW) ในการทดลองได้ปรับใช้กระแสไฟเชื่อม 60, 70, 80 และ 90 แอมแปร์ ซึ่งเป็นกระแสไฟตรงต่อขั้วตรง Direct Current Electrode Negative: DCEP และใช้แก๊สอาร์กอน 97 เปอร์เซ็นต์ เป็นแก๊สปกคลุมและ Backing Gas โดยเลือกใช้แท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตน EWTh-2 ซึ่งลึบปลายมุมทั้งสแตน 30 และ 60 องศา มีลวดเติมชนิด ER 308 และทำการเชื่อมในแบบท่าราบ

โดยค่าตัวแปรและสภาวะการทดสอบต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ซึ่งภายหลังจากการเชื่อมเสร็จแล้ว จะตรวจสอบคุณภาพแนวเชื่อมด้วยสายตาและพิจารณาพร้อมกับภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคและมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์ และทำการทดสอบด้วยเทคนิค EPR ตามลำดับ

2.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและมหภาค

1. เตรียมชิ้นงานทดสอบโดยเลือกชิ้นงานเชื่อมในสภาวะต่างๆ ที่มีความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมจากการผ่านการตรวจสอบด้วยสายตาแล้วมาตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพานในด้านตัดขวางแนวเชื่อมขนาด $5 \times 2.5 \times 0.3$ เซนติเมตร

2. เริ่มขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเพื่อให้ผิวหน้างานในแนวเชื่อมมีความเรียบสม่ำเสมอ โดยขัดกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ ขัดมันต์ด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.5 ไมครอน

3. ทำความสะอาดชิ้นงานในน้ำกลั่นและอะซิโตนเพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่ติดอาจอยู่กับผิวชิ้นงานด้วยเครื่องล้างอุลตราโซนิก แล้วเป่าด้วยลมร้อนเพื่อให้ชิ้นงานแห้ง

4. นำชิ้นงานไปกัดกรดออกซาลิก เข้มข้น 10% โดยป้อนศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์ ใช้ระยะเวลาประมาณ 2.30 นาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น 2 รอบ เป่าด้วยลมร้อนเพื่อให้ชิ้นงานแห้ง

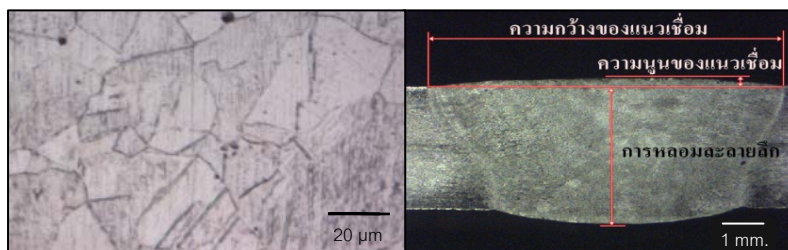
5. ถ่ายภาพโครงสร้างที่ต้องการทดสอบ เพื่อตรวจความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม วัดระยะหาลอมละลายเล็กน้อย ขนาดความ

กว้างและความนูนของแนวเชื่อม รวมทั้งศึกษาโครงสร้างจุลภาคและมหภาคที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานในสภาวะต่างๆ เพื่อสังเกตปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ของแต่ละชิ้นงานเชื่อมตัวอย่างที่ทำกรทดสอบ พร้อมทั้งจัดบันทึกข้อมูลต่างๆ ดังรูปที่ 2

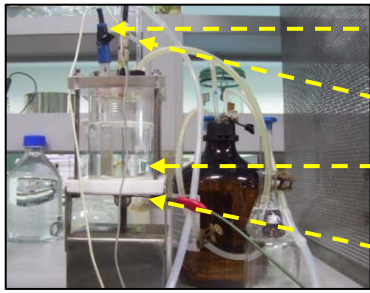
2.4 การทดสอบด้วยเทคนิค Electrochemical Potentio-kinetic Reactivation (EPR)

1. ตัดชิ้นงานขนาด $2.5 \times 2.5 \times 0.3$ เซนติเมตร (ตัดขวางกลางแนวเชื่อม) แล้วขัดด้วยกระดาษทรายเพื่อให้ผิวหน้างานเรียบสม่ำเสมอ เริ่มขัดกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 180 ถึงเบอร์ 1200 ล้างทำความสะอาดในน้ำและอะซิโตนด้วยเครื่องล้างอุลตราโซนิก เป่าด้วยลมร้อนให้ชิ้นงานแห้ง

2. เตรียมสารละลายที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G108-94: $0.5 \text{ M } H_2SO_4 + 0.01 \text{ M } KSCN$ ปริมาณ 1 ลิตร แล้วนำไล่ออกซิเจนออกจากสารละลายโดยการพ่นแก๊สไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ใช้เวลาประมาณ 30 นาที ก่อนการทดสอบ



รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ก่อนการเชื่อม และการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคเพื่อวัดขนาดของแนวเชื่อม GTAW จากแท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตน EWTh-2



ขั้ว Ag / AgCl (RE)
แท่ง Platinum (CE)
0.5 M H_2SO_4 + 0.01 M
SS 304 L (WE)



รูปที่ 3 เซลล์ทดสอบและเครื่อง Potentio / Galvanostat ที่ใช้ตรวจสอบการเกิดสภาวะ Sensitization ของเหล็กกล้าไร้สนิม

3. เปิดเครื่อง Potentio / Galvanostat EG&G 273 ตั้งค่าโปรแกรมการทดลองโดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า ได้แก่ เทคนิค E_{corr} vs Time เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ของระบบที่จะทำการทดสอบ และเทคนิค EPR เพื่อคำนวณหาค่า Q จากพื้นที่ใต้กราฟโพลาริเซชัน

4. นำชิ้นงานที่เพิ่งขัดเสร็จไม่เกิน 5 นาที มาต่อให้ครบเซลล์การทดสอบ (WE: ชิ้นงานตัวอย่าง, RE: ขั้ว Ag/AgCl, CE: แท่งแพลตินัม) จากนั้นจึงเทสารละลายที่เตรียมไว้ลงในเซลล์ทดสอบพร้อมพ่นแก๊สไนโตรเจน ตามรูปที่ 3 แล้วเริ่มการทดสอบหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และบันทึกผลจาก Polarization curve ที่ได้ป้อนค่าศักย์ไฟฟ้าให้กับชิ้นงานและติดตามวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป

3. ผลการทดลอง

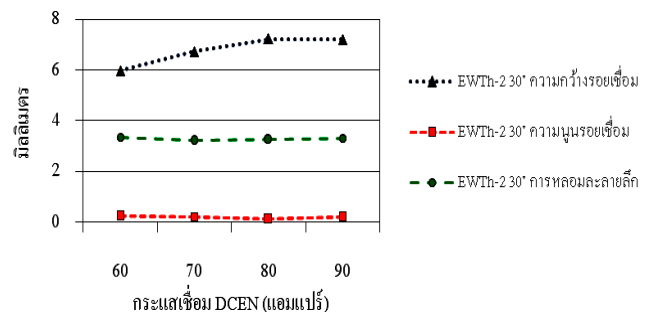
3.1 ภาพถ่ายโครงสร้างมหภาค

จากภาพถ่ายโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานตัวอย่างในสภาวะทดสอบต่างๆ ได้ตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมทั้งความกว้าง ระยะหลอมละลายและ ความหนาแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ผลการทดสอบพบว่า ที่กระแสไฟเชื่อม 60 แอมแปร์ จะให้ค่าความกว้างแนวเชื่อมต่ำที่สุด ซึ่งค่าความกว้างแนวเชื่อมจะปรับเพิ่มขึ้นเมื่อปรับใช้กระแสไฟ

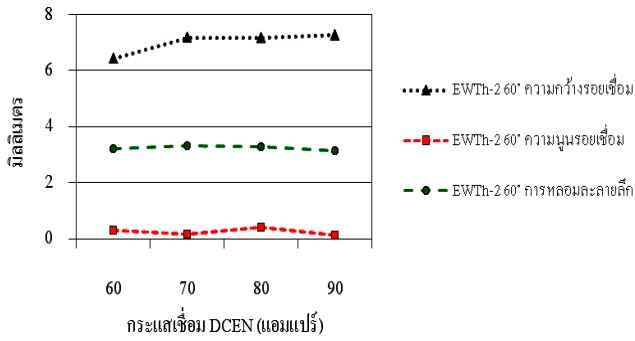
เชื่อมที่สูงขึ้นและงานเชื่อมจากการใช้แท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตน EWTh-2 ที่ลึบบ่ม 60 องศา จะให้

ค่าความกว้างแนวเชื่อมสูงกว่าการลึบบ่ม 30 องศาเล็กน้อย

สำหรับค่าความหนาของรอยเชื่อมและระยะหลอมละลายลึกจะมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนักในแต่ละสภาวะการทดสอบ โดยผลการทดสอบทั้งหมดได้แสดงผลไว้ในรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 4 ผลการวัดแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L จากแท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตน EWTh-2 ที่ลึบบ่ม 30 องศา



รูปที่ 5 ผลการวัดแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L จากแท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตน EWTh-2 ที่ลัดมุม 60 องศา

3.2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค

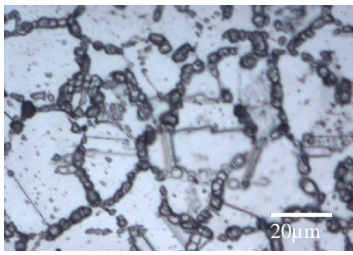
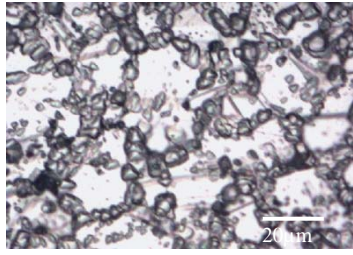
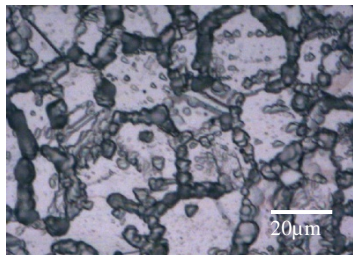
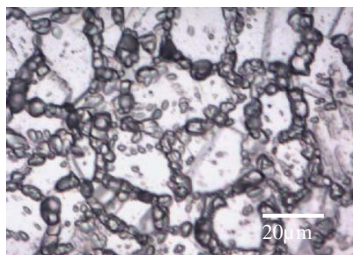
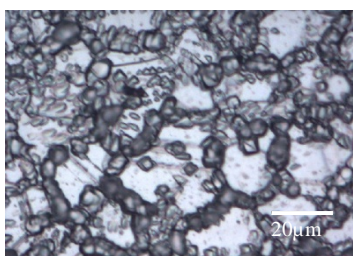
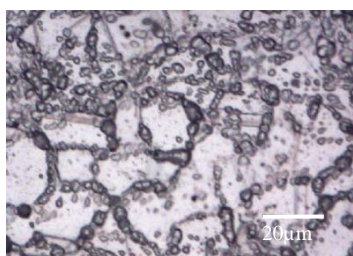
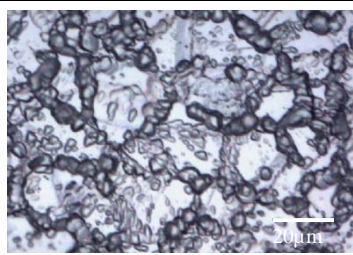
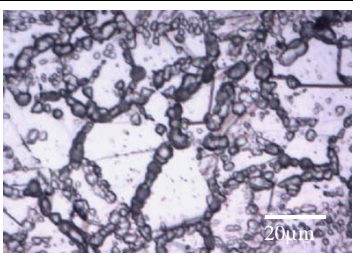
จากรูปที่ 6 แสดงภาพถ่ายจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างที่เชื่อมด้วยวิธี GTAW และเย็นตัวในอากาศ ซึ่งพบว่าในบริเวณกระแทกร้อน เม็ดเกรนจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานก่อนการเชื่อมและสังเกตเห็นเส้นสีดำขนาดเล็กตามบริเวณขอบเกรนซึ่งเป็นการรวมตัวกันระหว่างคาร์บอนและโครเมียมแล้วตกตะกอนเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ในแนวเชื่อมเนื่องจากบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) จะมีความร้อนสะสมอยู่ในช่วงอุณหภูมิวิกฤต (427-810 °C)

3.3 ผลการทดสอบจากเทคนิค Electrochemical Potentiokinetic Reactivation (EPR)

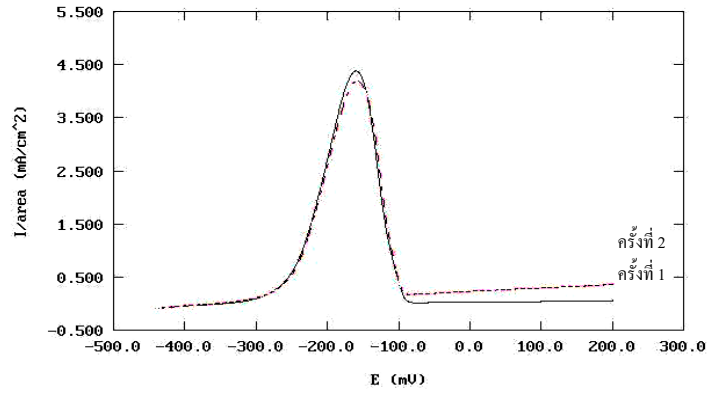
จากการวิจัยด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM G108-94 พบว่ากราฟ Polarization curve ที่เกิดขึ้นหลังจากการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 L หลังการเชื่อมจะมีช่วง Reactivation peak ในทุกสภาวะการทดสอบ โดยในแต่ละครั้งของการปรับค่ากระแสการเชื่อม จะ

ทำการทดสอบซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง เพื่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ผล (รูปที่ 7)

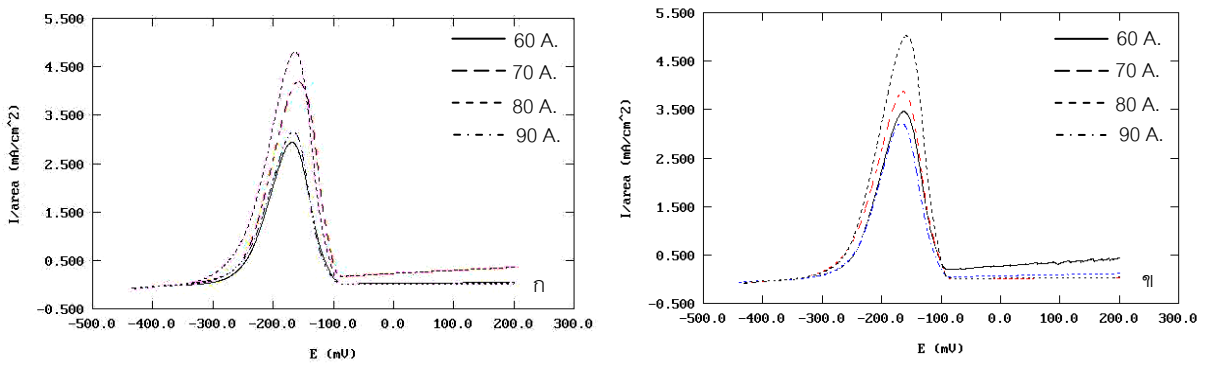
รูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าการใช้แท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตนEWTh-2 ที่ลัดมุม 30 องศา จะทำให้เกิดพื้นที่ใต้ของPolarization curve ในช่วง Reactivation peak มากกว่าแท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตน EWTh-2 ที่ลัดมุม 60 องศา และการปรับกระแสไฟเชื่อมเพิ่มขึ้น พื้นที่ใต้ของ Polarization curve ในช่วง Reactivation peak ก็จะไปปรับสูงขึ้นด้วย ยกเว้นที่กระแสไฟเชื่อม 90 แอมแปร์ ซึ่งลดลงมาต่ำกว่ากระแสไฟเชื่อม 80 แอมแปร์

กระแสเชื่อม	EWTh-2 ที่ลึบมุม 30 องศา	กระแสเชื่อม	EWTh-2 ที่ลึบมุม 60 องศา
60 A.		60 A.	
	Grain size = 12.5		Grain size = 14.2
70 A.		70 A.	
	Grain size = 12.1		Grain size = 13.2
80 A.		80 A.	
	Grain size = 12.4		Grain size = 13.6
90 A.		90 A.	
	Grain size = 13.7		Grain size = 13.1

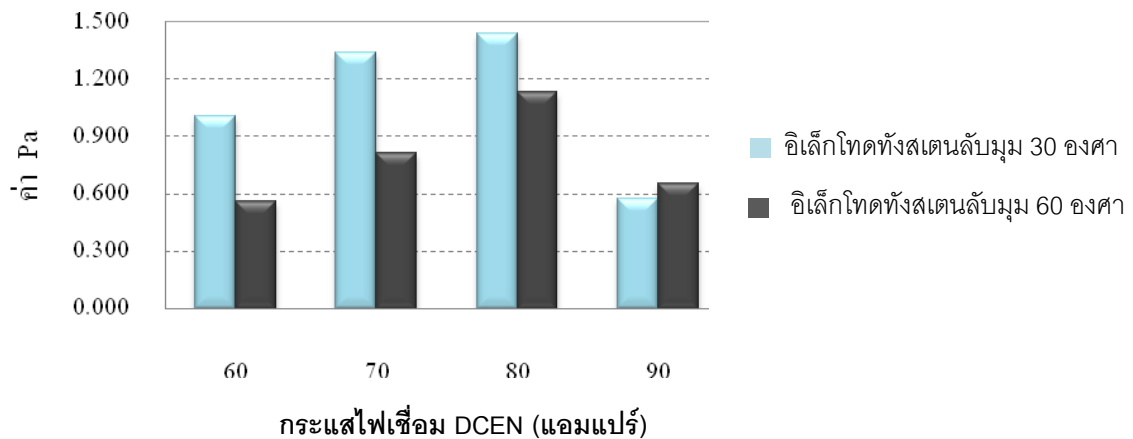
รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 L ที่เชื่อมด้วยวิธี GTAW และใช้อิเล็กโทรด EWTh-2 ที่ลึบมุม 30 และ 60 องศา โดยปรับกระแสเชื่อม 60, 70, 80 และ 90 แอมแปร์ ตามลำดับ



รูปที่ 7 Polarization curve จากเทคนิค EPR ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L จากวิธีเชื่อม GTAW ใช้แท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลส EWTh-2 ที่ลัดับมูม 30 องศา ที่กระแสเชื่อม 70 แอมแปร์



รูปที่ 8 Polarization curve จากเทคนิค EPR ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L: วิธีเชื่อม GTAW ที่ปรับค่ากระแสไฟเชื่อมต่างๆ โดยใช้แท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลส EWTh-2: (ก) ลัดับมูม 30 องศา (ข) ลัดับมูม 60 องศา



รูปที่ 9 กราฟแท่งแสดงค่า Pa ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L เชื่อมด้วยวิธี GTAW ที่ปรับค่ากระแสไฟเชื่อมต่างๆ และใช้แท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลส EWTh-2 ลัดับมูม 30 และ 60 องศา ตามลำดับ

จากรูปที่ 9 พบว่าค่า Pa ในทุกสภาวะการทดสอบนั้นมีค่ามากกว่า 0.4 แสดงว่าชิ้นงานเชื่อมทุกชิ้นได้รับอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ในบริเวณ HAZ ซึ่งค่า Pa จะปรับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกระแสไฟเชื่อม

สำหรับการใช้แท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตน EWT-2 ที่ลึบบ่ม 30 องศา จะแสดงค่า Pa สูงกว่าแท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตน EWT-2 ที่ลึบบ่ม 60 องศา ยกเว้นที่กระแสเชื่อม 90 แอมแปร์ ซึ่งแสดงค่า Pa ต่ำที่สุด

4. สรุปผลการวิจัย

4.1 ลักษณะโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

จากภาพถ่ายโครงสร้างมหภาคจากการตรวจสอบแนวเชื่อม GTAW ด้วยแท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตน EWT-2 ลึบบ่ม 30 และ 60 องศา ปรับกระแสเชื่อม DCEN ที่ 60, 70, 80 และ 90 แอมแปร์ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงขนาดของแนวเชื่อมซึ่งมี

ขนาดความกว้าง ความหนา และระยะหลอมละลายลึกของแนวเชื่อมเฉลี่ยอยู่ที่ 6.43, 0.24 และ 3.47 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยแนวเชื่อมที่ได้ไม่พบข้อบกพร่องของฟองอากาศ รอยแตกร้าว หรือการขาดการเชื่อมลึก จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ทั้งหมดที่ผ่านการเชื่อมมีความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมทุกชิ้น

จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมเรียบร้อยแล้ว พบว่าชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมดที่นำมาเชื่อมจะเกิดการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตกตะกอนตามขอบเกรนในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน

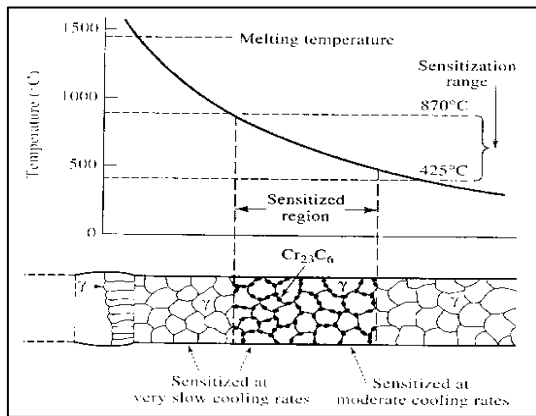
สามารถสังเกตได้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ก่อนการเชื่อมบริเวณขอบเกรนจะค่อนข้างขาวสะอาด แต่หลังการเชื่อมจะสังเกตเห็นจุดสีดำจำนวนมากกระจายอยู่ตามบริเวณขอบเกรน

4.2 การวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า

จากการทดสอบด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM G108-94 (เทคนิค EPR) เมื่อคำนวณหาค่า Pa ของแต่ละสภาวะจะพบว่า ในบริเวณกระแทกร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L มีปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์เกิดขึ้นมาก โดยที่การเชื่อมแบบ GTAW ซึ่งลึบบ่มแท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตน EWT-2 ที่ 30 องศา จะแสดงค่า Pa สูงกว่าแท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตน EWT-2 ที่ 60 องศา เนื่องจากการลึบบ่มที่ 30 องศาจะให้เปลวอาร์กที่เล็กและมีความร้อนสูง ชิ้นงานตัวอย่างจึงมีบริเวณที่ได้รับความร้อนแคบ การตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์จะเกิดอย่างหนาแน่น แต่สำหรับการลึบบ่มที่ 60 องศา จะให้เปลวอาร์กที่ใหญ่และความร้อนแผ่กระจายเป็นบริเวณกว้าง จึงทำให้เกิดการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์กระจายอยู่ทั่วไปในบริเวณที่ได้รับความร้อนที่กว้างกว่า ค่า Pa จึงลดลงสอดคล้องกับขนาดของความกว้างแนวเชื่อมที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

นอกจากนี้ กระแสไฟเชื่อมยังมีอิทธิพลต่อการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ โดยการใช้กระแสไฟเชื่อมต่ำๆ จะมีความร้อนจากการเชื่อมน้อยกว่าการใช้กระแสเชื่อมไฟสูง ดังนั้นค่า Pa ของกระแสไฟเชื่อมที่ 60 แอมแปร์ จึงมีค่าต่ำที่สุด ส่วนในกรณีของกระแสไฟเชื่อม 90 แอมแปร์ ซึ่งมีค่า Pa ลดลงอาจมีสาเหตุ เนื่องจากเป็นสภาวะเชื่อมที่มีความร้อน

เกิดขึ้นสูงมาก ทำให้มีการสลายตัวของโครเมียมคาร์ไบด์ซึ่งเป็นที่ทราบดีกันว่าในกรณีนี้ที่เหล็กกล้าไร้สนิมมีโครเมียมคาร์ไบด์ตกตะกอนตามขอบเกรน เมื่อได้รับความร้อนสูงกว่า 1000 °C โครเมียมคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นนั้นสามารถสลายตัวได้ โดยเมื่อขึ้นงานเย็นตัวลงปริมาณของโครเมียมคาร์ไบด์ก็จะลดลงด้วย ดังรูปที่ 10⁽⁵⁾



รูปที่ 10 ช่วงอุณหภูมิการเกิดและสลายตัวของโครเมียมคาร์ไบด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติกในบริเวณ HAZ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนายวีระชาติ คชเชนทร์ นายต่อศักดิ์ พรประภา และนายอภิรักษ์ มากมี นักศึกษาภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ที่เสียสละเวลามาร่วมทำงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kou S. "Welding Metallurgy", 2nd Edition, New Jersey, pp. 431-446, 2003.
- [2] รศ.ศิริลักษณ์ นิวิฐจรรยา "การกัดกร่อนและการเลือกใช้วัสดุ" ศูนย์ผลิตตำราเรียนสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ,กรุงเทพมหานคร, 2545
- [3] Srisuwan N. "Chromium carbide investigation with electrochemical technique for welding process development of stainless steel AISI 304" 2nd South-East Asia International Welding Congress pp 256-264, Bangkok , 2010.
- [4] ASTM Standard G108-94, "Standard test method for EPR for detecting sensitization of AISI Type 304 and 304L Stainless Steels", ASTM, pp. 457-463, 1994.
- [5] Sedriks A.J. "Corrosion of Stainless Steels", 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.