

การศึกษาผลกระทบของแก๊สปกคลุมที่มีต่อความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อม
ER308 และ ER308LSi ในกระบวนการเชื่อม GMAW-Pulse

นายสุพจน์ ทองดี วศ.บ. (วิศวกรรมโลหการ)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผศ. ดร. ไซยา คำคำ)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผศ. ดร. สมบุญ เจริญวิไลศิริ)

..... กรรมการ
(ดร. ไพฑูรย์ ช่างทอง)

..... กรรมการ
(ดร. จุลเทพ ขจรไชยกูล)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบของแก๊สปกคลุมที่มีต่อความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อม ER308 และ ER308LSi ในกระบวนการเชื่อม GMAW-Pulse
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายสุพจน์ ทองดี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาผลกระทบของแก๊สปกคลุมที่มีต่อความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม 2 ชนิด ประกอบด้วย ER308 และ ER308LSi โดยใช้กระบวนการเชื่อม GMAW-Pulse บนชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 หนา 2 มิลลิเมตร แก๊สปกคลุมที่ใช้ประกอบด้วยแก๊สผสมอาร์กอนกับออกซิเจน และแก๊สผสมอาร์กอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ ในการเชื่อมทดลองได้ทำการปรับสัดส่วนของออกซิเจนจาก 2% เป็น 5% โดยปริมาตร และปรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมเป็น 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% โดยปริมาตรตามลำดับ จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนชนิดและสัดส่วนของแก๊สผสม มีผลทำให้ลักษณะการเชื่อมและรูปร่างแนวเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงไป ธาตุผสมในรอยเชื่อมที่สามารถทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน เช่น ซิลิกอน แมงกานีส และโครเมียมมีแนวโน้มลดลง ในทางตรงข้ามรอยเชื่อมกลับมีธาตุคาร์บอนตกค้างเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อมทั้งสองชนิดมีแนวโน้มลดลง และมีเฟสซิกมาในลักษณะกระจายตัวอยู่ทั่วไป เมื่อรอยเชื่อมทั้งหมดถูกนำไปตรวจสอบและประเมินผลการกัดกร่อนแบบหลุมตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM G48-03 Method A พบว่ารอยเชื่อมที่มีการปรับสัดส่วนของแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มต่อการต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมลดลง ในขณะที่ความแข็งแรงรอยเชื่อมสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับผลการทดลองทั้งหมดได้ถูกอภิปรายไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

คำสำคัญ : การเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมด้วยพัลส์ / แก๊สปกคลุมรอยเชื่อม / ความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม / ปริมาณเฟอร์ไรต์

Thesis Title	A Study on the Influence of Shielded Gases on Pitting Corrosion Resistance of Weld Metal of ER308 and ER308LSi in GMAW-Pulse
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Supot Thongdee
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Sombun Charoenvilaisiri
Program	Master of Engineering
Field of Study	Metallurgical Engineering
Department	Production Engineering
Faculty	Engineering
Academic Year	2014

Abstract

This thesis is to study on the influence of various shielded gases on pitting corrosion resistance of stainless weld metal of ER308 and ER308LSi in GMAW-Pulse process. Applied base metal was austenitic stainless steel type AISI 304 with 2 millimeter in thickness. Two types of mixed shielding gases were applied including with (1) Ar + (2%-5%) O₂ and (2) Ar + (10%-50%) CO₂. Test results showed on characteristic changing of arc welding and those of bead profile. Alloying elements in weld metal were also affected, for instance Si, Mn and Cr were reduced but remaining of carbon in weld metal was increased. Ferrite content was decreased and there were some sigma phase in weld metal. Pitting corrosion resistance was investigated and evaluated using ASTM G48-03 Method A. Tendency of pitting corrosion resistance reduced when increasing ratio of O₂ and CO₂ in mixed shielding gases. On the other hand, hardness of weld metal was little increased as increasing ratio of CO₂ in mixed gases. Effect of increasing O₂ and CO₂ in mixed shielding gases on bead profile, chemical composition, ferrite content, hardness and pitting corrosion resistance of weld metal were discussed in this thesis.

Keywords : Ferrite content / GMAW-Pulse / Pitting corrosion resistance / Shielded gas

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งของ ผศ. ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาช่วยให้คำปรึกษา คำชี้แนะ ตรวจสอบและแก้ไข การเรียบเรียงข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำวิจัยทุกขั้นตอน ด้วยความเอาใจใส่แก่ผู้วิจัยอย่างยิ่ง รวมทั้ง รศ.ไพฑิณ เลิศจิระสวัสดิ์ อดีตอาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้กำลังใจและคำชี้แนะด้วยความหวังดีมาโดยตลอด และขอขอบคุณคุณวารินทร์ ชินพิเศษ ภรรยาของผู้วิจัยและผู้ที่เกี่ยวข้องต่างๆ ที่คอยให้กำลังใจ ความช่วยเหลือตลอดมา นอกเหนือสิ่งอื่นใดผู้วิจัยขอขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ที่คอยอยู่เคียงข้าง ผู้ที่คอยให้การอบรมสั่งสอนผู้วิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

คุณประโยชน์และความดีอันพึงมีจากการศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองฉบับนี้ ผู้วิจัย ขอมอบให้ครูอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อันเป็นพื้นฐานสำคัญที่ทำให้เกิดผลสำเร็จในการทำการศึกษาในครั้งนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ญ
ประมวลคำศัพท์และคำย่อ	ต

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ขั้นตอนการปฏิบัติงานวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 เหล็กกล้าไร้สนิม	6
2.2 การใช้เหล็กกล้าไร้สนิมกับระบบท่อไอเสียรถยนต์	8
2.3 ลักษณะทางโลหะวิทยาของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก	11
2.4 กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม	13
2.5 การเกิดเคลือบเฟอร์ไรต์และเฟสซิกมาในรอยเชื่อมออสเทนนิติก	17
2.6 การทำนายและการวัดปริมาณเฟอร์ไรต์	26
2.7 การกัดกร่อนในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก	32
2.8 การกัดกร่อนแบบหลุม	33
2.9 การกัดกร่อนโดยเคมีไฟฟ้าของโลหะ	36
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39

3. วิธีการทดลอง	42
3.1 การเลือกวัสดุสำหรับการเชื่อมทดสอบ	42
3.2 อุปกรณ์การเชื่อมทดสอบ	45
3.3 การกำหนดตัวแปรในการเชื่อมทดสอบ	47
3.4 ขั้นตอนการเชื่อมทดสอบ	48
3.5 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบแบบต่างๆ	51
3.6 การวัดขนาดและรูปร่างรอยเชื่อม	52
3.7 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อม	53
3.8 การทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุมตามมาตรฐาน ASTM G48-03 Method A	53
3.9 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเคมีไฟฟ้า	60
3.10 การวัดปริมาณเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อม	62
3.11 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาครอยเชื่อม	62
3.12 การตรวจสอบความแข็งรอยเชื่อม	64
4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	66
4.1 ผลการเชื่อมและรูปร่างแนวเชื่อมในสภาวะแก๊สปกคลุมชนิดต่างๆ	66
4.2 ผลการทดสอบส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อม	74
4.3 ผลการทดสอบการกัดกร่อน	79
4.4 ผลการทดสอบปริมาณเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อม	90
4.5 ผลการทดสอบโครงสร้าง	95
4.6 ผลการทดสอบความแข็งรอยเชื่อม	108
4.7 อภิปรายผลการทดสอบ	113
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	117
5.1 ลักษณะการเชื่อมจากการปรับสัดส่วนแก๊สผสม	117
5.2 ผลกระทบต่อส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อม	118
5.3 ความต้านทานการกัดกร่อนของรอยเชื่อม ER308 และ ER308LSi	118
5.4 ผลกระทบต่อปริมาณเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อม	120
5.5 โครงสร้างของรอยเชื่อม ER308 และ ER308LSi	121
5.6 ความแข็งของรอยเชื่อม ER308 และ ER308LSi	121

หน้า

5.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทดลอง	121
5.8 ข้อเสนอแนะในการทดลอง	122
เอกสารอ้างอิง	123
ภาคผนวก	125
ก. สภาวะสัญญาณไฟฟ้าจากการเชื่อมต่อโดยใช้แก๊สปipeline ชนิดต่างๆ	125
ข. สภาวะผลการทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อม	130
ค. เส้นโค้งโพลาไรเซชันแสดงสภาวะการกัดกร่อนของรอยเชื่อม	139
ง. โครงสร้างเฟสซิกม่าในรอยเชื่อมและชิ้นงาน	146
จ. สภาวะการทดสอบความแข็งแรงรอยเชื่อม	153
ฉ. โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม	156
ประวัติผู้วิจัย	160

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 การจำแนกเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มปกติ	6
2.2 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มปกติ	7
2.3 ตัวอย่างส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 และ 304L (%โดยน้ำหนัก)	8
2.4 ส่วนประกอบของระบบท่อไอเสียและวัสดุที่ใช้งาน	9
2.5 การใช้แก๊สปกคลุมรอยเชื่อมสำหรับกระบวนการ GMAW ในอุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนท่อไอเสียยานยนต์ที่ได้จากการสำรวจในจังหวัดกรุงเทพฯ ชลบุรี อยุธยาและระยอง	10
2.6 ผลของธาตุผสมต่างๆในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก	12
2.7 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเปลือยชนิด ER308 และ ER308LSi (% โดยน้ำหนัก)	14
2.8 การเลือกใช้แก๊สปกคลุมสำหรับกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมเหล็กกล้าไร้สนิม	16
2.9 อิทธิพลของธาตุผสมที่เติมลงในเหล็กกล้าไร้สนิมต่อความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม	33
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเชื่อม AISI 304 (%โดยน้ำหนัก)	43
3.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเปลือยชนิด ER308 (%โดยน้ำหนัก)	43
3.3 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเปลือยชนิด ER308LSi (%โดยน้ำหนัก)	44
3.4 สมบัติของแก๊สปกคลุมรอยเชื่อม	45
3.5 ตัวแปรคงที่สำหรับการกำหนดในการเชื่อมทดสอบ	48
3.6 ตัวแปรประเภทผันแปรในการเชื่อมทดสอบ	48
3.7 ส่วนผสมกรดสำหรับตรวจสอบโครงสร้างมหภาค	53
3.8 ส่วนผสมทางเคมีของสารละลาย Iron (III) Chloride Hexahydrate	56
3.9 ตัวแปรคงที่สำหรับการทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุม	57
3.10 ตัวแปรประเภทผันแปรในการทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุม	57
3.11 สภาวะการทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุม	58
3.12 ค่าคงที่ K สำหรับคำนวณอัตราการกัดกร่อน	60
3.13 ส่วนผสมกรดสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	63

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.1 ผลของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจากการเชื่อม	66
4.2 ค่าเฉลี่ยขนาดรูปร่างรอยเชื่อม ER308 ในสภาวะแก๊สปกคลุมต่างๆ	71
4.3 ค่าเฉลี่ยขนาดรูปร่างรอยเชื่อม ER308LSi ในสภาวะแก๊สปกคลุมต่างๆ	71
4.4 ส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อม ER308 (% โดยน้ำหนัก)	74
4.5 ส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อม ER308LSi (% โดยน้ำหนัก)	75
4.6 ผลทดสอบการกัดกร่อนด้วยเคมีไฟฟ้าของรอยเชื่อม ER308	89
4.7 ผลทดสอบการกัดกร่อนด้วยเคมีไฟฟ้าของรอยเชื่อม ER308LSi	89
4.8 ค่าโครเมียมและนิเกิลเทียบเท่าของรอยเชื่อม ER308 และ ER308LSi	90
4.9 ปริมาณเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อมจากการประมาณด้วยสมการ WRC-1992	91
4.10 สมบัติรอยเชื่อมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงแก๊สปกคลุมมาตรฐาน	115
ข.1 ผลการทดลองการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อม ER308 ครั้งที่ 1	131
ข.2 ผลการทดลองการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อม ER308 ครั้งที่ 2	132
ข.3 ผลการทดลองการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อม ER308 ครั้งที่ 3	132
ข.4 ผลการทดลองการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อม ER308 ครั้งที่ 4	133
ข.5 ผลการทดลองการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อม ER308 ครั้งที่ 5	133
ข.6 อัตราเฉลี่ยต่อการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อม ER308	134
ข.7 ผลการทดลองการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อม ER308LSi ครั้งที่ 1	135
ข.8 ผลการทดลองการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อม ER308LSi ครั้งที่ 2	136
ข.9 ผลการทดลองการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อม ER308LSi ครั้งที่ 3	136
ข.10 ผลการทดลองการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อม ER308LSi ครั้งที่ 4	137
ข.11 ผลการทดลองการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อม ER308LSi ครั้งที่ 5	137
ข.12 อัตราเฉลี่ยต่อการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อม ER308LSi	138
จ.1 ความแข็งรอยเชื่อม ER308 ในสภาวะแก๊สปกคลุมชนิดต่างๆ	154
จ.2 ความแข็งเฉลี่ยรอยเชื่อม ER308 ในสภาวะแก๊สปกคลุมชนิดต่างๆ	154
จ.3 ความแข็งรอยเชื่อม ER308LSi ในสภาวะแก๊สปกคลุมชนิดต่างๆ	155
จ.4 ความแข็งเฉลี่ยรอยเชื่อม ER308LSi ในสภาวะแก๊สปกคลุมชนิดต่างๆ	155

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
1.1	องค์ประกอบของระบบท่อไอเสียยานยนต์	2
2.1	การเก็บข้อมูลในการใช้งานที่เพิ่มขึ้นของเหล็กกล้าไร้สนิมต่อรถหนึ่งคัน	8
2.2	เฟสไดอะแกรมของ Fe-Cr-Ni	18
2.3	โครงสร้างยูเทคติกเฟอร์ไรต์ (A) และ โครงสร้าง Skeletal ferrite (B)	19
2.4	รูปแบบเฟอร์ไรต์ชนิดต่างๆในรอยเชื่อมอสเทนนิติก	19
2.5	โครงสร้างจุลภาคของเคลด้าเฟอร์ไรต์ (สีฟ้า) ในเมทริกซ์ของโครงสร้าง ออสเทนไนต์ (สีน้ำตาลอ่อน) ของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 312 โดยใช้สารละลาย Modified Murakami's reagent	21
2.6	การก่อตัวของเฟสซิกม่า (สีเขียวและส้ม) จากเคลด้าเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 312 ที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 816°C เป็นเวลา 160 ชั่วโมง โดยใช้สารละลาย Modified Murakami's reagent	21
2.7	โครงสร้างจุลภาคของเฟสซิกม่าในสภาวะการทำงานที่แตกต่างกันของ เหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนนิติก (a) สภาพหลังการหล่อของ AISI 309LSi, (b) สภาพหลังรีดของ AISI 316, (c) สภาพผ่านอัตราการรีด 50% ของ AISI 304	22
2.8	ไดอะแกรมเซฟเลอร์แสดงบริเวณที่เปราะของเฟสซิกม่า	23
2.9	ไดอะแกรมสมดุลแสดง Fe-Cr-Ni ternary ที่อุณหภูมิ 650°C	24
2.10	อัตราการตกผลึกของเฟสซิกม่าที่อุณหภูมิ 700°C	25
2.11	ปริมาณเฟอร์ไรต์ในเหล็กกล้าไร้สนิม	26
2.12	ไดอะแกรมเซฟเลอร์	28
2.13	ไดอะแกรมเดอลอง	28
2.14	ไดอะแกรม WRC-1992	29
2.15	Suutala diagram เมื่อใช้ทำนายความไวในการแตกร้าวของรอยเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนนิติก	31
2.16	ความไวต่อการแตกร้าวเทียบกับจำนวนเฟอร์ไรต์	32
2.17	กระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นที่ผิวโลหะจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า	37
2.18	Tafel polarization diagram แสดงเส้นกระแส anodic และ cathodic	38

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
3.1	หุ่นยนต์เชื่อม OTC Almega AX-V6 และเครื่องเชื่อมอินเวอร์เตอร์กระแสไฟตรง OTC DP-400	46
3.2	อุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า KEYENCE รุ่น NR-2010	46
3.3	ชุดจับยึดชิ้นงานเชื่อม	47
3.4	การทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนการเชื่อม	49
3.5	การประกอบชิ้นงานบนที่จับยึด	49
3.6	การปรับระยะปลายลวดเชื่อม	50
3.7	การปรับระยะมุมทอรัชเชื่อมให้ได้ขนาดและการทำ Pre-welding	50
3.8	การเชื่อมทดสอบ	51
3.9	การแบ่งชิ้นงานเพื่อการทดสอบ	51
3.10	ชิ้นงานหลังการตัด	54
3.11	การจัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทราย	54
3.12	อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุม	55
3.13	แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อของอิเล็กทรอนิกส์กับระบบวัดการกัดกร่อน	61
3.14	อุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์	64
3.15	เครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์	65
3.16	ทิศทางการวัดความแข็ง	65
4.1	รอยเชื่อมลวด ER308 ในสถานะแก๊สปกคลุมชนิดต่างๆ	68
4.2	รอยเชื่อมลวด ER308LSi ในสถานะแก๊สปกคลุมชนิดต่างๆ	69
4.3	การวัดขนาดรอยเชื่อม	70
4.4	การเปลี่ยนแปลงขนาดรอยเชื่อม ER308 ในสถานะแก๊สปกคลุมต่างๆ	72
4.5	การเปลี่ยนแปลงขนาดรอยเชื่อม ER308LSi ในสถานะแก๊สปกคลุมต่างๆ	72
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนในรอยเชื่อมกับการเปลี่ยนแปลงแก๊สปกคลุม	76
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิกอนในรอยเชื่อมกับการเปลี่ยนแปลงแก๊สปกคลุม	77
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแมงกานีสในรอยเชื่อมกับการเปลี่ยนแปลงแก๊สปกคลุม	77

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครเมียมในรอยเชื่อมกับการเปลี่ยนแปลง แก๊สปกคลุม	78
4.10	น้ำหนักสูญเสียเฉลี่ยในช่วงการทดสอบ 72 ชั่วโมงของรอยเชื่อม ER308	79
4.11	น้ำหนักสูญเสียเฉลี่ยในช่วงการทดสอบ 72 ชั่วโมงของรอยเชื่อม ER308LSi	80
4.12	อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของรอยเชื่อม ER308	80
4.13	อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของรอยเชื่อม ER308LSi	81
4.14	ตัวอย่างรอยเชื่อม ER308 ในสภาพหลังการทดสอบการกัดกร่อน	83
4.15	ตัวอย่างรอยเชื่อม ER308LSi ในสภาพหลังการทดสอบการกัดกร่อน	84
4.16	ตัวอย่างภาพตัดขวางรอยเชื่อม ER308 หลังการทดสอบการกัดกร่อน	85
4.17	ตัวอย่างภาพตัดขวางรอยเชื่อม ER308LSi หลังการทดสอบการกัดกร่อน	86
4.18	เส้นโค้งโพลาไรเซชันที่ได้จากการทดสอบการกัดกร่อนของรอยเชื่อม ER308	87
4.19	เส้นโค้งโพลาไรเซชันที่ได้จากการทดสอบการกัดกร่อนของรอยเชื่อม ER308LSi	88
4.20	ผลการคำนวณปริมาณเฟอร์ไรต์ในไดอะแกรม WRC-1992 ของรอยเชื่อม ER308	92
4.21	ผลการคำนวณปริมาณเฟอร์ไรต์ในไดอะแกรม WRC-1992 ของรอยเชื่อม ER308LSi	92
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับอัตราเทียบเท่าระหว่าง โครเมียมกับนิกเกิล	93
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมต่ออัตรา เทียบเท่าของโครเมียมกับนิกเกิลและปริมาณเฟอร์ไรต์ เมื่อเปลี่ยนแปลงชนิด แก๊สผสมในรอยเชื่อม	94
4.24	โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ER308 ตามสภาวะแก๊สปกคลุมต่างๆ	95
4.25	โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ER308LSi ตามสภาวะแก๊สปกคลุมต่างๆ	97

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.26	โครงสร้างรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด ER308 ที่กำลังขยายประมาณ 500 เท่า โดยใช้ Modified Murakami's reagent ที่อุณหภูมิ 90 – 100°C เป็นเวลา 10 วินาที บริเวณสีเทา-ฟ้าแสดงเคลด้าเฟอร์ไรต์ สีส้มแสดงเฟสซิกม่า โดยมีสีขาวของออสเทนไนต์เป็นแมทริกซ์	99
4.27	โครงสร้างรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด ER308LSi ที่กำลังขยายประมาณ 500 เท่าโดยใช้ Modified Murakami's reagent ที่อุณหภูมิ 90 – 100°C เป็นเวลา 10 วินาที บริเวณสีเทา-ฟ้าแสดงเคลด้าเฟอร์ไรต์ สีส้มแสดงเฟสซิกม่า โดยมีสีขาวของออสเทนไนต์เป็นแมทริกซ์	102
4.28	โครงสร้างและส่วนผสมทางเคมีในรอยเชื่อม ER308 เมื่อ (A) รอยเชื่อมที่ใช้ 98%Ar – 2%O ₂ เป็นแก๊สปกคลุมและ (B) รอยเชื่อมที่ใช้ 90%Ar – 10%CO ₂ เป็นแก๊สปกคลุม	105
4.29	โครงสร้างและส่วนผสมทางเคมีในรอยเชื่อม ER308LSi เมื่อ (A) รอยเชื่อมที่ใช้ 98%Ar – 2%O ₂ เป็นแก๊สปกคลุมและ (B) รอยเชื่อมที่ใช้ 90%Ar – 10%CO ₂ เป็นแก๊สปกคลุม	106
4.30	ความแข็งบริเวณรอยเชื่อม ER308 ในสภาพแก๊สปกคลุมต่างๆ	108
4.31	ความแข็งบริเวณรอยเชื่อม ER308LSi ในสภาพแก๊สปกคลุมต่างๆ	110
4.32	ค่าเปรียบเทียบความแข็งเฉลี่ยของรอยเชื่อม ER308 และ ER308LSi ในสภาพแก๊สปกคลุมต่างๆ	112
ก.1	กราฟแสดงกระแสและแรงดันไฟฟ้าจากการเชื่อมด้วยลวด ER308	126
ก.2	กราฟแสดงกระแสและแรงดันไฟฟ้าจากการเชื่อมด้วยลวด ER308LSi	128
ค.1	เส้นโค้งโพลาริเซชันที่ได้จากการทดสอบการกัดกร่อนของรอยเชื่อม ER308	140
ค.2	เส้นโค้งโพลาริเซชันที่ได้จากการทดสอบการกัดกร่อนของรอยเชื่อม ER308LSi	143
ง.1	โครงสร้างเฟสซิกม่า (สีส้ม) ในรอยเชื่อม ER308 และชิ้นงานที่กำลังขยายประมาณ 500 เท่า	147
ง.2	โครงสร้างเฟสซิกม่า (สีส้ม) ในรอยเชื่อม ER308LSi และชิ้นงานที่กำลังขยายประมาณ 500 เท่า	150

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
ฉ.1	โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม ER308 ในสภาวะแก๊สปกคลุมต่างๆ	157
ฉ.2	โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม ER308LSi ในสภาวะแก๊สปกคลุมต่างๆ	158

ประมวลคำศัพท์และคำย่อ

Active gas	=	แก๊สสำหรับงานเชื่อมที่สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจน
Austenite	=	โครงสร้างออสเทนไนต์
Base metal	=	โลหะหรือวัสดุที่ถูกเชื่อม
Cr _{eq}	=	โครเมียมเทียบเท่า
DCEP	=	กระแสไฟตรง ขั้วบวก
Ferrite	=	โครงสร้างเฟอร์ไรต์
Ferrite content	=	ปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรต์
Globular transfer	=	การถ่ายโอนน้ำโลหะจากปลายลวดสู่ชิ้นงานแบบเม็ดกลมโต
Lap joint	=	รอยต่อเกย ที่มีพื้นที่บางส่วนของชิ้นงานแผ่นบน-ล่างเกยทับกัน
Ni _{eq}	=	นิกเกิลเทียบเท่า
Pulse welding	=	การเชื่อมโดยใช้กระแสในลักษณะเป็นจังหวะสูง-ต่ำ
Robotic welding	=	กระบวนการเชื่อมอัตโนมัติ โดยใช้หุ่นยนต์
Shielded gas	=	แก๊สที่ใช้สำหรับปกป้องรอยเชื่อมจากอากาศภายนอก
Solid wire	=	ลวดเชื่อมเปลือย
Spray transfer	=	การถ่ายโอนน้ำโลหะจากปลายลวดสู่ชิ้นงานแบบเม็ดละเอียดหรือเป็นฝอยละออง
Weld metal	=	โลหะที่ถูกหลอมและแข็งตัวในระหว่างการเชื่อม ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของรอยเชื่อม
Wettability	=	ความสามารถด้านการกระจายตัวน้ำโลหะหลอมเหลวบนผิวหน้าชิ้นงาน
γ	=	เฟสแกมมา แทนโครงสร้างออสเทนไนต์
δ	=	เฟสเดลต้า แทนโครงสร้างเดลต้าเฟอร์ไรต์
σ	=	เฟสซิกมา