

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฉ
รายการสัญลักษณ์	ญ

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 สมมติฐานการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.6 นิยามคำศัพท์	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การเชื่อมแบบแก๊สเมทัลอาร์ค (Gas Metal Arc Welding : GMAW) หรือ การเชื่อมมิก/แม็ก (MIG/MAG Welding)	5
2.2 กระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม (Current and Speed)	7
2.3 แก๊สปกคลุม (Shielding Gas)	11
2.4 กลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic)	22
2.5 โลหะวิทยาการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Metallurgy Austenitic)	24
2.6 เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steel)	29
2.7 การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์	31
2.8 การเชื่อมโลหะต่างชนิด (Welding Dissimilar Metal)	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 การคำนวณอัตราการหลอมละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน	37
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38
3. วิธีดำเนินการวิจัย	43
3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล	43
3.2 กำหนดพารามิเตอร์การทดลอง	43
3.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลอง	43
3.4 การทดลองเบื้องต้น (Pilot Study)	48
3.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experimental)	49
3.6 ขั้นตอนการทดลอง	50
3.7 สถิติและการวิเคราะห์ข้อมูล	56
3.8 ขั้นตอนการแปลผล สรุป และเขียนวิทยานิพนธ์	59
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	60
4.1 การวิเคราะห์พารามิเตอร์การเชื่อมต่อความแข็งแรงดึงสูงสุด	60
4.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์การเชื่อมต่อความแข็งแรงดึงจุดคราก	64
4.3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์การเชื่อมต่ออัตราการยืดตัว	67
4.4 การวิเคราะห์พารามิเตอร์การเชื่อมต่อความแข็ง	70
4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)	71
5. สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	79
5.1 สรุปผลการทดลอง	79
5.2 อภิปรายผล	81
5.3 ข้อเสนอแนะ	82
เอกสารอ้างอิง	83

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ก. ส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (AISI 2205) และ ส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (AISI 304)	86
ข. ข้อมูลดิบ	87
ค. รูปชิ้นงานเชื่อม	90
ง. ผลงานที่ได้รับการที่เผยแพร่	93

ประวัติผู้วิจัย

97

รายการตาราง

ตาราง	หน้า	
2.1	สมบัติแก๊สปกคลุมชนิดต่าง ๆ และสมบัติ	14
2.2	แสดงข้อดี ข้อเสียของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	18
2.3	แสดงเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรดต่าง ๆ	24
2.4	แสดงเกรดเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ต่าง ๆ	31
2.5	ตัวอย่างแสดงอัตราการหลอมละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันที่ 30% Dilution	38
3.1	แสดงการออกแบบการทดลองขั้นต้น (Pilot study)	49
3.2	แสดงตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดสอบหาประสิทธิภาพในการเชื่อม	50
3.3	แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามทาง	58
4.1	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)	61
4.2	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อความแข็งแรงดึงจุดคราก (Yield Point)	64
4.3	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่ออัตราการยืดตัว (Elongation)	68
4.4	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อความแข็ง (Hardness)	71
ก.1	ตารางการทดสอบหาส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (AISI 2205)	87
ก.2	ตารางการทดสอบหาส่วนผสมทางเคมีของ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (AISI 304)	87
ข.1	แสดงข้อมูลดิบที่ใช้ในการทดลอง	88

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 แสดงเครื่องเชื่อมสำหรับกระบวนการเชื่อมแบบเมทัลอาร์ค	6
2.2 แสดงพื้นฐานหลักการอาร์คของกระบวนการเชื่อมแบบเมทัลอาร์ค	6
2.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากค่าความร้อนเข้าสู่โลหะงานที่ต่างกัน	8
2.4 ลักษณะรูปทรงของวงความร้อนของโลหะชนิดต่าง ๆ	9
2.5 ลักษณะรูปทรงของวงความร้อนเมื่อความเร็วในการเชื่อมต่างกัน	9
2.6 ผลของความเร็วในการเชื่อมโลหะบริสุทธิ์ และโลหะผสม	10
2.7 โครงสร้างของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วสูง (ก) และเชื่อมด้วยความเร็วต่ำ (ข)	11
2.8 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก	23
2.9 แสดงการเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่มีคาร์บอนอยู่ประมาณ 0.05%	25
2.10 แสดงการเกิด Sensitization ในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติก (ก) เฟสไดอะแกรม (ข) อุณหภูมิระหว่างการเชื่อม (ค) เส้นโค้งการตกผลึกและ (ง) โครงสร้างทางจุลภาค	26
2.11 แสดงอุณหภูมิและเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในการเชื่อม AISI 304	26
2.12 แสดงการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก (ก) เกรด 304 (ข) เกรด 321 ซึ่งเป็น เกรดเสถียร (Stabilized)	27
2.13 แสดง Knife-Line Attack บนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกลุ่มเพิ่มเสถียร (Stabilized)	28
2.14 แสดงการเกิด Sensitization ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกลุ่ม Stabilized (ก) เฟสไดอะแกรม (ข) อุณหภูมิระหว่างการเชื่อม (ค) เส้นโค้ง Precipitation และ (ง) โครงสร้างทางจุลภาค	29
2.15 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steels)	30
2.16 แสดงไดอะแกรมที่ส่วนผสม 68%Fe ของระบบโลหะผสม 3 ธาตุ (Fe-Cr-Ni ternary system)	32
2.17 ตัวอย่างการหลอมละลายเจือจางเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน 30% (30%Dilution) โดย กระบวนการเชื่อม GMAW	36
2.18 แสดงการหา Schaeffler diagram และหาอัตราการหลอมละลาย 30 % Dilution	37

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
3.1 เครื่องเชื่อมมิก (GMAW) รุ่น HOBART RC-256	44
3.2 เครื่องผสมแก๊ส (Gas Mixer)	45
3.3 เครื่องตัดแก๊สแบบเส้นตรงขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ รุ่น TANATA KT-5N	45
3.4 อุปกรณ์รองหลังงานเชื่อมและอุปกรณ์จับยึดในงานเชื่อม	46
3.5 เครื่องทดสอบความแข็ง รุ่น MMT-X7	46
3.6 กล้องไมโครสโคป รุ่น EZ4D	47
3.6 เครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมธาตุ (Optical Emission Spectro Meter) รุ่น DV 6	47
3.6 กล้องไมโครสโคป รุ่น Axiolaba	48
3.7 กล้องจุลทรรศน์ รุ่น EZ4D	47
3.8 กล้องจุลทรรศน์ รุ่น Axiolaba	48
3.9 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test)	48
3.10 แสดงวิธีการต่อชิ้นงานแบบต่อชน	51
3.11 แสดงวิธีการเชื่อมยึดหัว-ท้ายชิ้นงานด้วยแผ่นเหล็กกล้า	51
3.12 แสดงการจับยึดชิ้นงานก่อนการเชื่อม โดยใช้แผ่นทองแดงประกบด้านหลัง	52
3.13 แสดงวิธีการเชื่อมชิ้นงานด้วยกรรมวิธี GMAW	52
3.14 แสดงการออกแบบชิ้นงานเชื่อม เพื่อตัดทำการทดสอบความแข็ง แรงดึงและการศึกษาโครงสร้างจุลภาค	53
3.15 แสดงลักษณะชิ้นงานใช้ทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASME Section IX	54
3.16 แสดงตำแหน่งการทดสอบความแข็งบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) และบริเวณกระทบร้อน (HAZ)	55
3.17 แสดงวิธีการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness test)	55
3.18 แสดงการจัดชิ้นงานทดสอบ (Specimen) ด้วยเครื่องขัด	56
3.19 แสดงวิธีการตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงานทดลองด้วยกล้องจุลทรรศน์	56
4.1 แสดงการแจกแจงปกติข้อมูลของค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด	60
4.2 แสดงกราฟอิทธิพลร่วมต่อความแข็งแรงดึงสูงสุด ระหว่างกระแสไฟเชื่อม ความเร็วและแก๊สปกคลุม Ar+O ₂ (95:5)	62
4.3 แสดงกราฟอิทธิพลร่วมต่อความแข็งแรงดึงสูงสุด ระหว่างกระแสไฟเชื่อม ความเร็ว	62

และแก๊สปกคลุม Ar+CO₂ (95:5)

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
4.4	แสดงกราฟอิทธิพลร่วมต่อความแข็งแรงดึงสูงสุด ระหว่างกระแสไฟเชื่อม ความเร็ว และแก๊สปกคลุม Ar+O ₂ +Co ₂ (92:5:3)	63
4.5	แสดงกราฟอิทธิพลร่วมต่อความแข็งแรงดึงจุดคราก ระหว่างกระแสไฟเชื่อม ความเร็ว และแก๊สปกคลุม Ar+O ₂ (95:5)	65
4.6	แสดงกราฟอิทธิพลร่วมต่อความแข็งแรงดึงจุดคราก ระหว่างกระแสไฟเชื่อม ความเร็ว และแก๊สปกคลุม Ar+CO ₂ (95:5)	66
4.7	แสดงกราฟอิทธิพลร่วมต่อความแข็งแรงดึงจุดครากระหว่างกระแสไฟเชื่อม ความเร็ว และแก๊สปกคลุม Ar+O ₂ +Co ₂ (92:5:3)	66
4.8	แสดงการแจกแจงปกติของข้อมูลของค่าอัตราการยืดตัว	67
4.9	แสดงกราฟอิทธิพลร่วมต่ออัตราการยืดตัว ระหว่างกระแสไฟเชื่อม ความเร็ว และแก๊สปกคลุม Ar+O ₂ (95:5)	69
4.10	แสดงกราฟอิทธิพลร่วมต่ออัตราการยืดตัว ระหว่างกระแสไฟเชื่อม ความเร็ว และแก๊สปกคลุม Ar+CO ₂ (95:5)	69
4.11	แสดงกราฟอิทธิพลร่วมต่ออัตราการยืดตัว ระหว่างกระแสไฟเชื่อม ความเร็ว และแก๊สปกคลุม Ar+O ₂ +Co ₂ (92:5:3)	70
4.12	แสดงโครงสร้างจุลภาคของ Base Metal ของเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก (AISI 304) ที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด	72
4.13	แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทกร้อนของเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก (AISI 304) ที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด	72
4.14	แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทกร้อนของเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก (AISI 304) ที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด	73
4.15	แสดงโครงสร้างจุลภาคของ Base Metal ของเหล็กกล้าสแตนเลสดูเพล็กซ์ (AISI 2205) ที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด	73
4.16	แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทกร้อนด้านเหล็กกล้าสแตนเลสดูเพล็กซ์ (AISI 2205) ที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด	74

4.17	แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด	74
------	--	----

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
4.18	แสดงโครงสร้างจุลภาคของ Base Metal ของเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก (AISI 304) ที่มีค่าความเค้นแรงดึงต่ำสุด	75
4.19	แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระพุ้งร้อนของเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก (AISI 304) ที่มีค่าความเค้นแรงดึงต่ำสุด	76
4.20	แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระพุ้งร้อนของเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก (AISI 304) ที่มีค่าความเค้นแรงดึงต่ำสุด	76
4.21	แสดงโครงสร้างจุลภาคของ Base Metal ของเหล็กกล้าสแตนเลสดูเพล็กซ์ (AISI 2205) ที่มีค่าความเค้นแรงดึงต่ำสุด	77
4.22	แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระพุ้งร้อนด้านเหล็กกล้าสแตนเลสดูเพล็กซ์ (AISI 2205) ที่มีค่าความเค้นแรงดึงต่ำสุด	77
4.23	แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมที่มีค่าความเค้นแรงดึงต่ำสุด	78
ค.1	แสดงรูปของชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงดึงที่สูงที่สุด โดยการเชื่อมที่พารามิเตอร์ การเชื่อมกระแส 180 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 350 มม./นาทีก๊าซปกคลุม Ar+CO ₂ (95 : 5)	91
ค.2	แสดงรูปของชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำที่สุด โดยการเชื่อมที่พารามิเตอร์ การเชื่อม กระแสไฟเชื่อม 200 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 300 มม./นาทีก๊าซปกคลุม Ar + O ₂ + CO ₂ (92 : 5 : 3)	92

รายการสัญลักษณ์

B	=	แรงลอยตัว
E	=	แรงจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
ER	=	Electrode Rod
FN	=	Ferrite Number
M	=	แรงจากแรงดึงดูดผิวของโลหะเหลว
r	=	ระยะรัศมีจากจุดอาร์ค
T	=	อุณหภูมิ
η	=	ประสิทธิภาพของการเชื่อม
γ	=	สัมประสิทธิ์แรงดึงดูดผิว
ρ	=	ความหนาแน่น
Ar	=	อาร์กอน
CO ₂	=	คาร์บอนไดออกไซด์
O ₂	=	ออกซิเจน
H ₂	=	ไฮโดรเจน
N ₂	=	ไนโตรเจน
q	=	ความหนาแน่นของพลังงาน