

สารบัญ

หน้า

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

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 สมมุติฐานการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.6 นิยามศัพท์	4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 กระบวนการเชื่อม Gas Tungsten Arc Welding	6
2.2 ความหมายของเหล็กกล้าไร้สนิม	18
2.3 ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม	19
2.4 ธาตุและการให้คุณสมบัติของธาตุที่ผสมลงในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม	20
2.5 การเลือกใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิม	22
2.6 เหล็กกล้าไร้สนิมคูเพล็กซ์ (Duplex)	22
2.7 การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม	33
2.8 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมต่อความสามารถในการเชื่อม	34
2.9 อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อม	36
2.10 การพาของโลหะหลอมเหลวในแอ่งรอยเชื่อม	37
2.11 การแข็งตัวของโครงสร้างผลึกของแนวเชื่อม	40
2.12 โลหะวิทยาในรอยเชื่อม (Welding Metallography)	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.13 การทดสอบความแข็งของวัสดุ	47
2.14 คุณสมบัติของธาตุต่างๆ ที่ใช้ทำฟลักซ์	49
2.15 คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)	52
2.16 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	54
3 วิธีดำเนินการวิจัย	56
3.1 ศึกษาเอกสารตำราและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	56
3.2 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	57
3.3 การออกแบบการทดลองเบื้องต้น (Pilot Study)	62
3.4 การออกแบบการทดลอง (Experimental design)	63
3.5 ขั้นตอนดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล	64
3.6 สถิติที่ใช้ในการทดลอง	67
4. ผลการทดลอง	70
4.1 ผลการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness) จากการทดลองเบื้องต้น	70
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ อิทธิพลของฟลักซ์และกระแสไฟเชื่อม มีผลต่อค่าความแข็ง	71
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ อิทธิพลของฟลักซ์และกระแสไฟเชื่อม มีผลต่ออัตราการซึมลึกของแนวเชื่อม	73
4.4 การวิเคราะห์ลักษณะผิวของแนวเชื่อม	76
4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค (Macrostructure)	77
4.6 เปรียบเทียบระยะการซึมลึกโดยใช้ฟลักซ์แต่ละชนิดและไม่ใช้ฟลักซ์	82

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5. สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	84
5.1 สรุปผลการทดลอง	84
5.2 อภิปรายผล	89
5.3 ประโยชน์ที่ได้จากการทำวิจัย	90
5.4 ข้อเสนอแนะ	91
 เอกสารอ้างอิง	 92
 ภาคผนวก	
ก. โครงสร้างมหภาค	95
ข. รูปชิ้นงานทดลองและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	101
ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่	107
 ประวัติผู้วิจัย	 123

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงมาตรฐานของลวดเชื่อมทั้งสแตน	18
2.2 ตารางแสดงส่วนผสมทางเคมีและปริมาณสมมูลความต้านทานการกัดกร่อนแบบ หลุมบ่อ (PRE) ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์	24
2.3 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์	27
2.4 สมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์	27
2.5 การประยุกต์ใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์	29
2.6 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่เป็นโลหะ	54
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ AISI 2205 (มาตรฐาน)	58
3.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ AISI 2205 (จากการทดสอบจากชิ้นงาน) วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง Emission Optical Spectrometer (BAIR DV6)	58
3.3 ค่าตัวแปรสำหรับการใช้ในการทดลองเบื้องต้น	63
3.4 การสุ่มชิ้นงานทดลอง Experimental design	64
4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA ต่อความแข็งแรงบริเวณแนวเชื่อม (Welded) และบริเวณ เขตอิทธิพลความร้อน (HAZ)	71
4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA อิทธิพลของฟลักซ์และกระแสไฟเชื่อมมีผลต่อ อัตราการซึมลึก	74
5.1 ข้อมูลเปรียบเทียบระยะซึมลึกเฉลี่ยจากแนวเชื่อมโดยใช้ฟลักซ์และไม่ใช้ฟลักซ์	86
5.2 ข้อมูลเปรียบเทียบระยะความกว้างเฉลี่ยจากแนวเชื่อมโดยใช้ฟลักซ์และไม่ใช้ฟลักซ์	86
5.3 ข้อมูลเปรียบเทียบอัตราการซึมลึกเฉลี่ยจากแนวเชื่อมโดยใช้ฟลักซ์และไม่ใช้ฟลักซ์	87
5.4 การเปรียบเทียบลักษณะการซึมลึกและความกว้างของแนวเชื่อม อัตราส่วนการ ซึมลึกต่อความกว้างของแนวเชื่อม (Depth/Width ratio)	88
ก.1 โครงสร้างมหภาคชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ AISI2205 ที่ทาฟลักซ์และไม่ทา ฟลักซ์ก่อนการเชื่อม	96

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของการเชื่อม TIG	7
2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้กับการเชื่อม TIG	8
2.3 เครื่องเชื่อมTIG	9
2.4 กระแสตรงขั้วลบ (DCEN)	9
2.5 กระแสตรงขั้วบวก (DCEP)	10
2.6 กระแสไฟสลับและระบบความถี่สูง AC.HF	11
2.7 หัวเซรามิกส์ครอบทั้งสแตนเลสเล็กโทรด	13
2.8 แสดงส่วนประกอบหัวเชื่อม TIG	14
2.9 แสดงแนวเส้นการแตงปลายทั้งสแตนที่ถูกต้องสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม	16
2.10 แสดงแนวเส้นการแตงปลายทั้งสแตนที่ผิดสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม	17
2.11 แสดงปลายที่เจียรนัยแล้วของทั้งสแตนเลสเล็กโทรดในการเชื่อมแต่ละแบบ	17
2.12 แสดงปลายที่เจียรนัยแล้วของทั้งสแตนเลสเล็กโทรดในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม	18
2.13 ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์	23
2.14 ไดอะแกรมการเปลี่ยนแปลงเวลา-อุณหภูมิ (TTT-Diagram) ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการตกผลึกของธาตุผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์	25
2.15 แผนภูมิ WRC-1992 สำหรับทำนายปริมาณเฟอไรต์ในเหล็กกล้าไร้สนิม	25
2.16 ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด Alloy 2205 โดยทำการ กัดผิวด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ (ก) ลักษณะโครงสร้างในทิศทางขนานกับแนวรีด (ข) ลักษณะโครงสร้างในทิศทางขวางกับแนวรีด (ค) ลักษณะโครงสร้างในทิศทางขนานกับแนวรีด ซึ่งถ่ายโดยกำลังขยายสูงกว่ารูป (ก)	26
2.17 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อดูเพล็กซ์เกรด Alloy 2205 โดยทำการกัดผิวด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์	26
2.18 แผนภาพกิ่งสมดุลการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก-โครเมียม-นิกเกิล (ส่วนผสมของธาตุเหล็ก 68% โดยน้ำหนัก)	30
2.19 แสดงผลของสมบัติทางกายภาพต่อการเชื่อม	34
2.20 แสดงการเปรียบเทียบการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน	35

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
2.21 แสดงลักษณะการแผ่กระจายของวงจรความร้อนเมื่อความเร็วในการเชื่อมต่างกัน	36
2.22 แสดงการเกิดโครงสร้างของรอยเชื่อมกรณีใช้ความเร็วต่างกัน	36
2.23 การพาของโลหะหลอมเหลวจากแรงลอยตัว	38
2.24 การพาของโลหะหลอมเหลวจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	39
2.25 การพาของโลหะหลอมเหลวจากแรงอันเนื่องมาจากความตึงผิว	39
2.26 การเปลี่ยนแปลงทิศทางการพาของโลหะหลอมเหลว	40
2.27 แสดงลักษณะเติบโตของเกรนของโลหะเชื่อม	41
2.28 การเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณ HAZ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ รูป (ก) ปริมาณไนโตรเจนต่ำ และ(ข) ปริมาณไนโตรเจนสูง	43
2.29 โนโมแกรมสำหรับการทำนายเวลาที่ใช้ในการเย็นตัวช่วง $\Delta t_{12/8}$ ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า ไร้สนิมดูเพล็กซ์	43
2.30 โครงสร้างทางมหภาค Columnar ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์แบบหลาย แนวเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อม GTAW	44
2.31 ผลของระดับปริมาณไนโตรเจนในเนื้อรอยเชื่อมโดยใช้ก๊าซอาร์กอนที่มีส่วนผสมของ ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซคลุมแนวเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบทังสเตนอาร์ค (GTAW) (ก) เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด S31803/S32205 (ข) เหล็กกล้าไร้สนิม ซูเปอร์ดูเพล็กซ์	46
2.32 การทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์	47
2.33 ลักษณะแร่ควอทซ์	51
2.34 โครงสร้างผลึกซิลิคอน	51
3.1 ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ AISI 2205 ที่ใช้ในการทดลอง	57
3.2 ลักษณะผงเคมีที่ใช้ในการทำฟลักซ์	58
3.3 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมฟลักซ์	59
3.4 ถังบรรจุแก๊สอาร์กอน	59
3.5 เครื่องเชื่อมทิก Long well ขนาด 215 Amp	60
3.6 อุปกรณ์ควบคุมอัตราความเร็วในการเชื่อม	60
3.7 กล้องจุลทรรศน์ Stereo Microscope	61

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.8 เครื่องขัดมัน (Polishing)	61
3.9 เครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Hardness Test)	62
3.10 แสดงตำแหน่งบริเวณที่ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค	65
3.11 แสดงตำแหน่งบริเวณที่ตรวจสอบค่าความแข็ง	66
4.1 การทดสอบการแจกแจงข้อมูล ค่าความแข็งของแนวเชื่อม	70
4.2 แสดงกราฟปฏิสัมพันธ์อิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างกระแสไฟเชื่อมและ ฟลักซ์ของค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อม (Welded) และบริเวณเขตอิทธิพล ความร้อน Heat Affected Zone (HAZ)	72
4.3 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็ง ระหว่างระดับกระแสไฟเชื่อมและฟลักซ์ชนิดต่าง ๆ ที่บริเวณแนวเชื่อม (Welded) และบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน Heat Affected Zone (HAZ)	73
4.4 แสดงกราฟปฏิสัมพันธ์อิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างฟลักซ์และกระแสไฟเชื่อม มีผลต่อการซึมลึกและความกว้างของแนวเชื่อม	75
4.5 กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราการซึมลึกต่อความกว้างของแนวเชื่อม	75
4.6 เปรียบเทียบลักษณะแนวเชื่อม จากการเชื่อมโดยไม่ใช้ฟลักซ์และการเชื่อมโดยใช้ฟลักซ์	76
4.7 ลักษณะการซึมลึกและความกว้าง ที่ทำด้วยฟลักซ์อลูมิเนียมออกไซด์ ที่กระแสไฟ 150 Amp	77
4.8 ลักษณะการซึมลึกและความกว้าง ที่ทำด้วยฟลักซ์อลูมิเนียมออกไซด์ ที่กระแสไฟ 180 Amp	77
4.9 ลักษณะการซึมลึกและความกว้าง ที่ทำด้วยฟลักซ์อลูมิเนียมออกไซด์ ที่กระแสไฟ 210 Amp	78
4.10 ลักษณะการซึมลึกและความกว้าง ที่ทำด้วยฟลักซ์ซิลิกอนออกไซด์ ที่กระแสไฟ 150 Amp	78
4.11 ลักษณะการซึมลึกและความกว้าง ที่ทำด้วยฟลักซ์ซิลิกอนออกไซด์ ที่กระแสไฟ 180 Amp	79
4.12 ลักษณะการซึมลึกและความกว้าง ที่ทำด้วยฟลักซ์ซิลิกอนออกไซด์ ที่กระแสไฟ 210 Amp	79

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.13 ลักษณะการซึมลึกและความกว้างที่ทำด้วยฟลักซ์ไทเทเนียมออกไซด์ที่กระแสไฟ 150 Amp	80
4.14 ลักษณะการซึมลึกและความกว้างที่ทำด้วยฟลักซ์ไทเทเนียมออกไซด์ที่กระแสไฟ 180 Amp	80
4.15 ลักษณะการซึมลึกและความกว้างที่ทำด้วยฟลักซ์ไทเทเนียมออกไซด์ที่กระแสไฟ 210 Amp	81
4.16 เปรียบเทียบลักษณะการซึมลึกและความกว้างของแนวเชื่อม ที่ได้จากการเชื่อมโดยใช้ฟลักซ์ชนิดต่าง ๆ กับไม่ทาฟลักซ์ก่อนทำการเชื่อม	82
5.1 เปรียบเทียบระดับความแข็งแรงของแนวเชื่อมจากเหล็กกล้าไร้สนิม จากการเชื่อมโดยใช้ฟลักซ์และไม่ใช้ฟลักซ์มาก่อนทำการเชื่อม	85
5.2 เปรียบเทียบระดับความแข็งแรงของแนวเชื่อมจากเหล็กกล้าไร้สนิม จากการเชื่อมโดยใช้ฟลักซ์และไม่ใช้ฟลักซ์มาก่อนทำการเชื่อม ที่ระดับกระแสไฟเชื่อมต่างกัน	85
5.3 เปรียบเทียบอัตราการซึมลึกของแนวเชื่อมและแนวเชื่อมจากการเชื่อมโดยใช้ฟลักซ์และไม่ใช้ฟลักซ์มาก่อนทำการเชื่อม	87
ข.1 แสดงชิ้นงานทดลองเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อม TIG	102
ข.2 แสดงการเตรียมชิ้นงานทดลองเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อม TIG	102
ข.3 แสดงชิ้นงานทดลองเชื่อมทาฟลักซ์พร้อมที่จะเชื่อม	102
ข.4 แสดงการทาฟลักซ์ลงบนชิ้นงานทดลอง	103
ข.5 แสดงการตั้งค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ในการเชื่อม	103
ข.6 แสดงการทดสอบการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม	103
ข.7 แสดงชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้วของการทาฟลักซ์ไทเทเนียมออกไซด์	104
ข.8 แสดงชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้วของการทาฟลักซ์ซิลิกอนออกไซด์	104
ข.9 แสดงชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้วของการทาฟลักซ์อลูมิเนียมออกไซด์	104
ข.10 แสดงชิ้นงานที่เชื่อมที่จะไปทดสอบความแข็งแรงและทดสอบโครงสร้างมหภาค	105
ข.11 แสดงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมฟลักซ์	105

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
ข.12 แสดงผงฟลักซ์ชนิดต่าง ๆ	106
ข.13 แสดงเครื่องขัดมัน (Polishing)	106
ข.14 แสดงเครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Hardness Test)	106