

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 แนวคิดและที่มาของโครงการ	1
1.2 จุดประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 หลักการพื้นฐานการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน	3
2.2 ตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน	5
2.3 กลไกสำคัญในการเชื่อมยึดอลูมิเนียมและเหล็ก	6
2.4 โลหะวิทยาพื้นฐานของอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม	7
2.5 การทดสอบสมบัติทางกล	13
2.6 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค	18
2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	22
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ	27
3.1 แผนการดำเนินงาน	27
3.2 วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์	28
3.2 กรรมวิธีการเชื่อม	31
3.4 การทดสอบแรงดึง	36
3.5 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค	37
3.7 ตรวจสอบลักษณะรอยฉีกขาดของรอยเชื่อมและวิเคราะห์การกระจายตัวของอิเล็กตรอน	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	41
4.1 อิทธิพลของความเร็วรอบและความเร็วเดินแนวเชื่อมในการเชื่อม	41
4.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลและโครงสร้างมหภาคของรอยต่อชน	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 อิทธิพลของการเชื่อมด้วยความเร็ว 250 รอบ/นาทีและความเร็วเดินแนว เชื่อมในการเชื่อมต่าง ๆ	43
4.4 อิทธิพลของการเชื่อมด้วยความเร็ว 500 รอบ/นาที และความเร็วเดินในการ เชื่อมต่าง ๆ	64
4.5 อิทธิพลของการเชื่อมด้วยความเร็ว 750 รอบ/นาที	76
4.6 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคลักษณะรอยฉีกขาด	88
4.7 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อม	94
4.8 วิเคราะห์การกระจายตัวอิเล็กตรอนบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อม	99
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	102
5.1 สรุปผลการทดลอง	102
5.2 ข้อเสนอแนะ	102
บรรณานุกรม	104
ภาคผนวก	106

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมบริสุทธิ์	8
2.2	สมบัติของอลูมิเนียมผสม	9
2.3	ส่วนผสมทางเคมีและกลสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม	11
2.4	โมดูลัสการยืดหยุ่นของโลหะบางชนิด	15
2.5	ความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุดของโลหะบางชนิด	16
2.6	รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นตรวจสอบที่เป็นเหล็ก	20
2.7	รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นตรวจสอบที่เป็น โลหะนอกกลุ่มเหล็ก	21
4.1	ส่วนผสมทางเคมีของอินเทอร์เฟสบนรอยต่อที่แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของแต่ละชนิดของตัวกวน	101

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (FSW)	3
2.2	กลไกการเกิดการรวมตัวของวัสดุ	4
2.3	ตำแหน่งการเริ่มสอดตัวกวนเข้าสู่แนวรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก	7
2.4	การทดสอบแรงดึง: (ก) การให้แรงแก่ชิ้นงาน (ข) ชิ้นทดสอบ (ค) เครื่องทดสอบ	12
2.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด	12
2.6	การกระจายตัวของความเค้นเนื่องจาก (ก) รูวงกลม และ (ข) รูวงรี	17
2.7	องค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎีสำหรับชิ้นงานรูปร่างต่างๆ	17
2.8	การเตรียมชิ้นทดสอบ โครงสร้างจุลภาค	19
2.9	การขัดผิวชิ้นทดสอบ	19
2.10	ภาพแสดงอำนาจแยกแยะของ SEM	22
2.11	แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	23
2.12	แผนภาพแสดงสัญญาณต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร	24
2.13	ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ	24
2.14	ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ	25
2.15	สเปกตรัมของเทคนิคเอเนอร์จิสเพอร์ซีฟสเปกโทรเมตรี (EDS)	25
3.1	แผนภาพการไหลโดยรวมขั้นตอนการดำเนินงาน	27
3.2	อุปกรณ์จับยึด	28
3.3	เครื่องกัดอัตโนมัติซีเอ็นซี (CNC Milling Machine)	29
3.4	เครื่องตัดชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาค	29
3.5	เครื่องกลึง (Machine lathe)	30
3.6	เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง	30
3.7	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	31
3.8	ส่วนต่างๆ ของตัวกวน	31
3.9	ลักษณะและขนาดของตัวกวนรูปทรงกระบอก (หน่วย : มม.)	32
3.10	ลักษณะและขนาดของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว (หน่วย : มม.)	33
3.11	ลักษณะและขนาดของตัวกวนรูปทรงกรวย (หน่วย : มม.)	33
3.12	ลักษณะและขนาดของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว (หน่วย : มม.)	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.13	การขึ้นรูปเครื่องมือเชื่อมด้วยการกลึง	34
3.14	การขึ้นรูปเครื่องมือเชื่อมด้วยการกลึง	35
3.15	ตำแหน่งการตัดชิ้นงานเชื่อมเพื่อทำขึ้นทดสอบแรงดึงแบบเลื่อน (หน่วย: มม.)	36
3.16	ใบเครื่องมือตัด	37
3.17	ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (หน่วย : มม.)	37
3.18	อุปกรณ์การหล่อเรซิน	38
3.19	ชิ้นงานหลังการหล่อเรซิน	38
3.20	การขัดกระดาษทราย	39
3.21	น้ำยาที่ใช้ในการกัดกรด	39
3.22	เครื่องสแกน	40
3.23	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	40
4.1	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกและความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที	43
4.3	รอยขีดข่วนที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงดึงของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	44
4.4	รอยขีดข่วนภาคตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	45
4.5	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	46
4.6	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาทีและความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	47

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวถนรูปทรงกระบอกเกลียวและความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที	48
4.8	รอยร้าวที่สังเกตเห็นทดสอบความแข็งแรงดึงของตัวถนรูปทรงกระบอกเกลียว ที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาทีและความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	48
4.9	รอยร้าวที่สังเกตเห็นของตัวถนรูปทรงกระบอกเกลียว ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	49
4.10	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวถนรูปทรงกระบอกเกลียว ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	49
4.11	ผิวหน้ารอยเชื่อมของตัวถนรูปทรงกรวย ที่ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	51
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงและความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ ที่เชื่อมด้วยตัวถนรูปทรงกรวยและความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	51
4.13	รอยร้าวที่สังเกตเห็นที่เชื่อมตัวถนรูปทรงกรวยที่ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	52
4.14	รอยร้าวที่สังเกตเห็นที่เชื่อมด้วยตัวถนรูปทรงกรวย ที่ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.15	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยที่ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	54
4.16	ผิวหน้ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ที่ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	55
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียวที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที	55
4.18	รอยลักษณะขึ้นทศสอบความแข็งแรงดึงที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	57
4.19	รอยลักษณะภาคตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ(ฉ) 175 มม./นาที	57
4.20	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบที่ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	58
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง และความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปร่างต่างๆ ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที	59
4.22	ผิวหน้ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	60
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.24	รอยฉีกขาดของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	61
4.25	รอยฉีกขาดภาคตัดขวางของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	62
4.26	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนของตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ (ก) 50 (ข) 75 (ค) 100 (ง) 125 (จ) 150 และ (ฉ) 175 มม./นาที	62
4.27	ผิวหน้ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียว ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	63
4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงและความเร็วเดินแนวเชื่อมของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที	64
4.29	รอยฉีกขาดของชิ้นทดสอบแรงดึงที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	65
4.30	รอยฉีกขาดของรอยต่อของชิ้นทดสอบแรงดึงที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	66
4.31	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเกลียวที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.32	ผิวหน้ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงกรวยที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	68
4.33	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงกรวยที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที	68
4.34	รอยลักษณะของชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงที่เชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงกรวยที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	69
4.35	รอยลักษณะภาคตัดขวางของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงกรวยที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	70
4.36	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงกรวยที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	70
4.37	ผิวหน้ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	72
4.38	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงกรวยเกลียวที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที	73
4.39	รอยลักษณะชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงที่เชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	74
4.40	รอยลักษณะภาคตัดขวางของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.41	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	74
4.42	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ความเร็วเดินแนวเชื่อม รูปแบบตัวกวนที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที	75
4.43	ผิวหน้ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	76
4.44	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที	77
4.45	รอยขีดขาดขึ้นทดสอบความแข็งแรงดึงที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	77
4.46	รอยขีดขาดภาคตัดขวางของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ (ฉ) 175 มม./นาที	79
4.47	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	79
4.48	ผิวหน้ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวย ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	80
4.49	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกรวยที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.50	รอยฉีกขาดซึ่งทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงกรวย ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	81
4.51	รอยฉีกขาดภาคตัดขวางของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงกรวย ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	83
4.52	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงกรวย ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	83
4.53	ผิวหน้ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	84
4.54	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงกรวยเกลียวที่ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที	85
4.55	รอยฉีกขาดซึ่งทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	85
4.56	รอยฉีกขาดภาคตัดขวางของซึ่งทดสอบความแข็งแรงดึงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	86
4.57	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวถ่วงรูปทรงกรวยเกลียว ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ: (ก) 50 มม./นาที (ข) 75 มม./นาที (ค) 100 มม./นาที (ง) 125 มม./นาที (จ) 150 มม./นาที และ(ฉ) 175 มม./นาที	86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.58	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง และความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปร่างต่างๆ ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที	88
4.59	ตำแหน่งโครงสร้างจุลภาครอยร้าวของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก	88
4.60	ตำแหน่ง โครงสร้างจุลภาครอยร้าวของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก	89
4.61	ตำแหน่ง โครงสร้างจุลภาครอยร้าวของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียว	90
4.62	ตำแหน่ง โครงสร้างจุลภาครอยร้าวของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียว	91
4.63	ตำแหน่ง โครงสร้างจุลภาครอยร้าวของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย	91
4.64	ตำแหน่ง โครงสร้างจุลภาครอยร้าวของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวย	92
4.65	ตำแหน่ง โครงสร้างจุลภาครอยร้าวของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียว	93
4.66	ตำแหน่ง โครงสร้างจุลภาครอยร้าวของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยเกลียว	93
4.67	โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมตัวตัวกวนทรงกระบอก ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด – ต่ำสุด	95
4.68	โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมตัวตัวกวนทรงกระบอกเกลียว ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด – ต่ำสุด	96
4.69	โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมตัวตัวกวนทรงกรวย ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด – ต่ำสุด	97
4.70	โครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมตัวตัวกวนทรงกรวยเกลียว ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด - ต่ำสุด	98
4.71	โครงสร้างอินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมที่แสดงความแข็งแรงดึงสูงสุด: (ก) โครงสร้างมหภาคของรอยต่อ (ข)-(ค) ทรงกระบอก (ง)-(จ) ทรงกระบอกเกลียว (ฉ)-(ช) ทรงกรวย และ (ซ)-(ฅ) ทรงกรวยเกลียว	100