

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



248512

โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของรอยต่อชนอะลูมิเนียมผสม 6061
โดยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

สุขแก้ว คำเมืองลา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
กันยายน 2554



248512

600253039

โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของรอยต่อชนอะลูมิเนียมผสม 6061

โดยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



สุขแก้ว คำเมืองสา

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง

ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กันยายน 2554

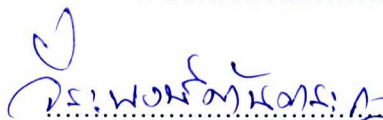
โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของรอยต่อชนอะลูมิเนียมผสม 6061
โดยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

สุขแก้ว คำเมืองสา

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร. จีระพงษ์ ตันตระกุล


.....
รองศาสตราจารย์ ดร. นรินทร์ สิริกุลรัตน์


.....กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร. นรินทร์ สิริกุลรัตน์


.....กรรมการ
อาจารย์ ดร. จิตร์ดนัย บุญเรือง

16 กันยายน 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.นรินทร์ สิริกุลรัตน์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจแก้ไขจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จีระพงษ์ ดันตระกุล ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. นรินทร์ สิริกุลรัตน์ และอาจารย์ ดร. ฉัตรดนัย บุญเรือง ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้คำแนะนำเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผน กระทรวงพลังงาน ที่สนับสนุนทุนการศึกษาแก่ผู้เขียน ตลอดมาทั้งระดับปริญญาตรีและระดับปริญญาโท รวมทั้งบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่อุดหนุนทุนวิจัยนี้บางส่วน

ขอขอบพระคุณ แผนกวิชาช่างกลโรงงานและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคนิคจังหวัดลำพูน ศูนย์เทคโนโลยีเฉพาะทาง การตรวจสอบสภาพรอยเชื่อมแบบไม่ทำลาย มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง จังหวัดเชียงใหม่ และศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ตลอดจน บริษัทเชียงใหม่สกายแอคเวนเจอร์ จำกัด ที่กรุณาให้ข้อมูลและความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือ ซึ่งได้รับความสะดวกด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณจิราพันธ์ ครรชนิเพชร คุณชญาณัฐ ปุ๊ดคำฟู คุณลดาภักดิ์ ชุมประเสริฐ คุณนาถ โมลด์ คุณพรรณนิภา คำเมืองสา คุณพัชราพรรณ คำเมืองสา คุณปนัดดา รุ่งสาโรจน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณพ่อ คุณแม่ รวมทั้งญาติมิตรทุกคน ตลอดจนพี่ๆ น้องๆ เพื่อนร่วมงานในภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ หากมีสิ่งใดขาดตกบกพร่อง หรือมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนต้องขออภัยเป็นอย่างสูง และขอน้อมรับในความผิดพลาดและข้อบกพร่องนั้น แต่ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์เล่มนี้ คงมีประโยชน์บ้างไม่มากก็น้อย สำหรับภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนผู้ที่สนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับ การเชื่อมอะลูมิเนียมด้วยเทคนิคการเสียดทานแบบกวน ต่อไปภายหน้า

สุขแก้ว คำเมืองสา

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของรอยต่อชนอะลูมิเนียมผสม 6061 โดยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน
ผู้เขียน	นายสุชแก้ว คำเมืองสา
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วัสดุศาสตร์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร. นรินทร์ สิริกุลรัตน์

บทคัดย่อ

248512

อะลูมิเนียมผสม 6061-T6 ความหนา 6.0 มิลลิเมตร ถูกนำไปเชื่อมแบบต่อชนด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยการประยุกต์ใช้เครื่องกัดโลหะแบบกึ่งอัตโนมัติ ด้วยสลักแกนหมุนกวนสองแบบ คือ แบบทรงกระบอกผิวเกลียวปลายตัด และแบบทรงกระบอกผิวเรียบปลายมน ด้วยมุมเอียงหัวกดเชื่อม 2.5 องศา ความเร็วการรอบ 950 และ 1,180 รอบต่อนาที ความเร็วการเชื่อม 475 600 และ 750 มิลลิเมตรต่อนาที ตัวอย่างงานเชื่อมถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค พบว่า ตัวอย่างที่เชื่อมด้วย สลักแกนหมุนกวนแบบทรงกระบอกผิวเรียบปลายมนความเร็วรอบ 1,180 รอบต่อนาที ความเร็วเชื่อม 600 มิลลิเมตรต่อนาที มีความต้านแรงดึงสูงสุด 256 ± 5 เมกะปาสกาล และการยึดตัวเฉลี่ยร้อยละ 10 คิดเป็นประสิทธิภาพความแข็งแรง และการยึดตัวเทียบกับแผ่นโลหะที่ไม่ถูกเชื่อมได้ประมาณร้อยละ 87 และ 57 ตามลำดับ ผลการวัดค่าความแข็งภาคตัดรอยเชื่อม พบว่า บริเวณที่อ่อนที่สุดอยู่กลางรอยเชื่อม มีค่าความแข็งเฉลี่ย 85 VHN ค่าความแข็งลดลงเฉลี่ย 22 VHN จากแผ่นโลหะที่ไม่ถูกเชื่อม การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาครอยเชื่อม และพฤติกรรมการแตกหัก พบว่าโครงสร้างมีขนาดเกรนละเอียดในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจากการเสียดสีทางกล และบริเวณที่อ่อนแอที่สุดอยู่ในบริเวณนี้

Thesis Title	Microstructures and Mechanical Properties of Aluminum Alloy 6061 Butt-Joint by Friction Stir Welding
Author	Mr. Sookkaew Khammuangsa
Degree	Master of Science (Materials Science)
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Narin Sirikulrat

ABSTRACT

248512

Aluminum alloy 6061-T6 rolled plate with a thickness of 6.0 mm was used for butt joint friction stir welding. The semi-auto universal knee type milling machine was used for welding with two types stir axles; the straight end threaded surface axle (SETSA) and sphere end smooth surface axle (SESSA) and a tilting angle of 2.5 degree. Two rotating speeds of 950 and 1180 rpm with travelling speeds of 450, 600 and 750 mm/min. were used in this work. Microstructures and mechanical properties of welded zone were investigated. The highest tensile strength and average elongation of 256 ± 5 MPa and 10% were respectively observed in the specimen welded with SESSA rather than SETSA at a traveling speed of 600 mm/min and a rotating speed of 1180 rpm. The joint efficiency of the strength and elongation comparing to that of the parent plate was found to be about 90% and 57% respectively. Result from microhardness testing through weld area indicated that the hardness of the weld area was soften to be about 22 VHN comparing to 85 VHN in the parent metal. From weld microstructure and fracture behavior observation indicated that the fine grain structure was found in the thermo- mechanically affected zone and the weakest area was also found in this area.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ฐ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย	3
1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่สำคัญ	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 นิยามคำศัพท์ที่สำคัญ	5
2.2 กระบวนการเชื่อมโลหะ	7
2.3 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน	7
2.3.1 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบเชิงเส้น	8
2.3.2 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบหมุน	8
2.4 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน	9
2.4.1 หัวกดเชื่อม	10
2.4.2 บำให้ความร้อน	11
2.4.3 สลักแกนหมุนกวน	12
2.5 ขั้นตอนเทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	14
2.6 รอยต่องานเชื่อมเสียดทานแบบกวน	15

2.7 ข้อดีและข้อเสียของเทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	16
2.7.1 ข้อดีของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	17
2.7.2 ข้อเสียของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	17
2.8 เหล็กกล้า	17
2.8.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	18
2.8.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง	18
2.8.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง	18
2.8.4 กลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น	19
2.8.5 การเทียบมาตรฐานเหล็กกล้าเครื่องมือ	21
2.9 อะลูมิเนียมและโลหะผสมของอะลูมิเนียม	22
2.9.1 การแบ่งเกรดอะลูมิเนียม	22
2.9.2 การเพิ่มความแข็งแรงอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีทางความร้อน	24
2.9.3 อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นกลุ่ม 6XXX	24
2.9.4 อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอนเกรด 6061-T6	25
2.10 การทดสอบแรงดึงรอยเชื่อม	26
2.10.1 มอดูลัสของความยืดหยุ่น	28
2.10.2 ความเค้นจุดคราก	29
2.10.3 ความต้านทานแรงดึงสูงสุด	31
2.10.4 เปอร์เซนต์การยืดตัว	32
2.10.5 เปอร์เซนต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด	32
2.11 การทดสอบความแข็ง	33
2.11.1 การทดสอบความแข็งแบบวิเกอร์ส	34
2.11.2 การทดสอบความแข็งแบบบรูโน	36
2.12 การทดสอบงานเชื่อมด้วยวิธีทางโลหะวิทยา	38
2.12.1 การทดสอบโครงสร้างระดับมหภาค	38
2.12.2 การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค	38
2.12.3 การตัดชิ้นทดสอบ	38
2.12.4 การจับยึดชิ้นทดสอบ	40
2.12.5 การเตรียมผิวชิ้นทดสอบ	42
2.12.6 การกัดชิ้นรอย	44

2.12.7	กล้องจุลทรรศน์สำหรับโลหะ	46
2.13	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	47
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานทดลองวิจัย	50
3.1	การเตรียมอุปกรณ์ประกอบการวิจัย	50
3.1.1	กำหนดเงื่อนไขการทดลอง	50
3.1.2	การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างทดสอบ	52
3.2	การสร้างอุปกรณ์ประกอบทดลอง	53
3.2.1	การประดิษฐ์อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน	53
3.2.2	ชุดหัวกดเชื่อม	55
3.2.3	อุปกรณ์วัดระยะความลึกการเชื่อม	59
3.3	การเชื่อมทดสอบ	60
3.3.1	การติดตั้งอุปกรณ์และปรับตั้งตำแหน่ง	60
3.3.2	การทดลองเชื่อมทดสอบ	63
3.4	การทดสอบด้วยแรงดึง	65
3.4.1	การตัดแบ่งตัวอย่าง	66
3.4.2	เตรียมตัวอย่างทดสอบแรงดึง	67
3.4.3	การทดสอบรอยเชื่อมด้วยแรงดึง	67
3.5	การเตรียมตัวอย่างทดสอบด้วยวิธีทางโลหะวิทยา	68
3.5.1	การตัดชิ้นงานทดสอบ	69
3.5.2	การขึ้นเรือนชิ้นทดสอบแบบเย็น	69
3.5.3	การเตรียมผิวชิ้นทดสอบ	69
3.5.4	การกัดชิ้นรอยเตรียมโครงสร้าง	70
3.5.5	การถ่ายภาพโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์สำหรับโลหะ	70
3.6	การทดสอบค่าความแข็งในรอยเชื่อม	71
3.6.1	สภาวะแวดล้อมทดสอบความแข็ง	72
3.6.2	การทำความสะอาดชิ้นทดสอบ	72
3.6.3	การกดทดสอบความแข็ง	72
3.6.4	การคำนวณค่าความแข็ง	73

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	74
4.1 ผลการตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยวิธีตรวจพินิจ	74
4.1.1 ผลการทดลองสลักแกนหมุนกวนผิวเรียบ 950 รอบต่อนาที	75
4.1.2 ผลการทดลองสลักแกนหมุนกวนผิวเรียบ 1,180 รอบต่อนาที	76
4.1.3 ผลการทดลองสลักแกนหมุนกวนผิวเกลียว 950 รอบต่อนาที	77
4.1.4 ผลการทดลองสลักแกนหมุนกวนผิวเกลียว 1,180 รอบต่อนาที	78
4.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงรอยเชื่อม	78
4.2.1 ผลการทดสอบแรงดึงรอยเชื่อมจากกลุ่มตัวอย่าง R-L	79
4.2.2 ผลการทดสอบแรงดึงรอยเชื่อมจากกลุ่มตัวอย่าง R-H	80
4.2.3 ผลการทดสอบแรงดึงรอยเชื่อมจากกลุ่มตัวอย่าง T-L	81
4.2.4 ผลการทดสอบแรงดึงรอยเชื่อมจากกลุ่มตัวอย่าง T-H	82
4.2.5 ผลการเปรียบเทียบความเร็วในการเชื่อมกับแรงดึงสูงสุด	83
4.2.6 ผลการเปรียบเทียบความเร็วรอบหัวกดเชื่อมกับแรงดึงสูงสุด	84
4.2.7 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของรอยเชื่อมกับวัสดุเดิม	85
4.3 ผลการทดสอบด้วยวิธีทางโลหะวิทยาระดับมหภาค	85
4.3.1 ผลกระทบทางความร้อนที่ความเร็วรอบ 950 รอบต่อนาที	86
4.3.2 ผลกระทบทางความร้อนที่ความเร็วรอบ 1,180 รอบต่อนาที	86
4.4 ผลการทดสอบด้วยวิธีทางโลหะวิทยาระดับจุลภาค	87
4.4.1 โครงสร้างจุลภาคในรอยเชื่อมชิ้นงาน R-H600	87
4.4.2 โครงสร้างจุลภาคในรอยเชื่อมชิ้นงาน R-L600	89
4.5 ผลการทดสอบค่าความแข็งในรอยเชื่อม	91
4.5.1 ค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยสลักแกนหมุนกวนแบบผิวเรียบ	91
4.5.2 ค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยสลักแกนหมุนกวนแบบผิวเกลียว	92
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ	93
5.1 สรุปผลการพัฒนาเครื่องกัดโลหะเพื่องานเชื่อมต่อโลหะ	93
5.2 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางกลในรอยเชื่อม	93
5.2.1 ผลการศึกษาความต้านทานแรงดึงสูงสุด	93
5.2.2 ผลการศึกษาค่าความแข็งบริเวณภาคตัดรอยเชื่อม	94
5.3 สรุปผลการศึกษาโครงสร้างในรอยเชื่อมระดับมหภาคและจุลภาค	94

ญ

5.3.1 ผลการศึกษาโครงสร้างภาคตัดรอยเชื่อมระดับมหภาค	94
5.3.2 ผลการศึกษาโครงสร้างภาคตัดรอยเชื่อมระดับจุลภาค	95
5.4 ข้อเสนอแนะ	95
5.4.1 ข้อเสนอแนะประเด็นปัญหากรณีที่หนึ่ง	95
5.4.2 ข้อเสนอแนะประเด็นปัญหากรณีที่สอง	96
เอกสารอ้างอิง	97
ภาคผนวก	102
ภาคผนวก ก ตารางเทียบเกรดเหล็กนานาชาติ และกระบวนการชุบแข็งเหล็ก เครื่องมืองานเย็น D2	103
ภาคผนวก ข ใบรับรองวัสดุและคุณลักษณะจำเพาะของเครื่องกัดโลหะ	111
ภาคผนวก ค ตัวอย่างแบบใบรายงานผลการทดสอบงานเชื่อม	118
ภาคผนวก ง ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในรอยเชื่อม	126
ประวัติผู้เขียน	139

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2-1 วัสดุสร้างหั่วคเชื่อมในงานโลหะผสม	11
2-2 ขนาดบ่าให้ความร้อนตามชนิดความหนาวัสดุเชื่อม	12
2-3 ขนาดสลักแกนหมุนกวนเชื่อมสำหรับอะลูมิเนียมผสมบางเกรด	12
2-4 สัญลักษณ์เหล็กกล้าเครื่องมือตามระบบ AISI	19
2-5 การเทียบเกรดมาตรฐานเหล็กเครื่องมืองานเย็น	21
2-6 การแบ่งเกรดอะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นตามมาตรฐานอเมริกา	23
2-7 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม AA6061-T6	25
2-8 สมบัติทางความร้อนของอะลูมิเนียมผสม AA6061-T6	25
2-9 สมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสม AA6061-T6	26
2-10 ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ	30
2-11 ช่วงแรงกดวัดความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ส	35
2-12 ช่วงเวลากดวัดความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ส	35
2-13 สารเคมีกัดขึ้นรอยระดับมหภาคงานเชื่อมอะลูมิเนียมผสม	45
2-14 สารเคมีกัดขึ้นรอยระดับจุลภาคอะลูมิเนียมผสม	46
3-1 เงื่อนไขการดำเนินงานทดลอง	52
3-2 เปรียบเทียบสมบัติทางกลอะลูมิเนียม 6061-T6 มาตรฐานกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	52
3-3 เปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีอะลูมิเนียม 6061-T6 มาตรฐานกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	52
3-4 ลำดับแผนการทดลองเชื่อมทดสอบ	63
3-5 ระยะเวลาวัดทดสอบค่าความแข็งแรงมาตรฐาน	73
4-1 ผลการตรวจสอบรอยเชื่อมกลุ่มตัวอย่าง R-L	75
4-2 ผลการตรวจสอบรอยเชื่อมกลุ่มตัวอย่าง R-H	76
4-3 ผลการตรวจสอบรอยเชื่อมกลุ่มตัวอย่าง T-L	77
4-4 ผลการตรวจสอบรอยเชื่อมกลุ่มตัวอย่าง T-H	78
4-5 ผลการทดสอบแรงดึงรอยเชื่อมกลุ่มตัวอย่าง R-L	79
4-6 ผลการทดสอบแรงดึงรอยเชื่อมกลุ่มตัวอย่าง R-H	80

4-7	ผลการทดสอบแรงดึงรอยเชื่อมกลุ่มตัวอย่าง T-L	81
4-8	ผลการทดสอบแรงดึงรอยเชื่อมกลุ่มตัวอย่าง T-H	82
4-9	ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะทางกลของรอยเชื่อมกับวัสดุเดิม	85

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2-1 ลักษณะการเชื่อมเสียดทานแบบเชิงเส้น	8
2-2 ลักษณะการเชื่อมเสียดทานแบบหมุน	8
2-3 ลักษณะการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	10
2-4 ลักษณะผิวบ่าให้ความร้อนของหัวกดเชื่อม	12
2-5 ลักษณะสลักแกนหมุนกวนแบบพื้นฐาน	13
2-6 สลักแกนหมุนกวนทรงเรียวผิวเกลียวลักษณะพิเศษ	13
2-7 การประมาณความยาวของสลักแกนหมุนกวน	14
2-8 ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	15
2-9 ลักษณะรอยต่อการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	16
2-10 ลักษณะรอยต่อการเชื่อมแบบหลอมละลาย	16
2-11 ตัวอย่างงานเชื่อมแบบต่อชนสองด้าน	16
2-12 ขั้นตอนการเชื่อมตามมาตรฐาน AWS D17.3/D17.3M:200X	27
2-13 เครื่องมือทดสอบความเค้น-ความเครียดในรูปแบบแรงดึง	27
2-14 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด	29
2-15 กราฟแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปวัสดุในโลหะ	30
2-16 แสดงการเปลี่ยนรูปของโลหะจนหักขาด	31
2-17 พฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของวัสดุแบบเหนียวและเปราะ	33
2-18 ลักษณะรอยกดทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ส	34
2-19 ลักษณะรอยกดทดสอบความแข็งแรงแบบนูน	37
2-20 การเปรียบเทียบรอยกดระหว่างนูนและวิกเกอร์ส	37
2-21 แสดงวิธีการตัดตัวอย่างทดสอบ	39
2-22 ลักษณะใบตัดอะแบร์ชีฟ	40
2-23 การขึ้นเรือนขึ้นทดสอบแบบร้อน	42
2-24 การขึ้นเรือนขึ้นทดสอบแบบเย็น	42
2-25 แสดงรอยขีดเก่าและรอยขีดใหม่	43

2-26	การสะท้อนแสงที่ตกกระทบตั้งฉากขอบและผิวเกรน	44
2-27	การหักเหของแสงจากกล้องจุลทรรศน์สำหรับโลหะ	47
2-28	การสะท้อนแสงจากสว่างเป็นมืดและมืดเป็นสว่าง	47
3-1	แสดงลำดับขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	51
3-2	ขนาดกำหนดการเตรียมชิ้นทดสอบอะลูมิเนียม	53
3-3	แสดงการประกอบชุดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน	54
3-4	แผ่นรองหลังอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน	54
3-5	ลักษณะแผ่นกดยึดชิ้นงานที่สร้างสำเร็จ	55
3-6	แสดงการประกอบชุดอุปกรณ์หัวกดเชื่อม	56
3-7	ลักษณะปากจับหัวกดเชื่อม	56
3-8	ลักษณะฝาครอบหัวกดเชื่อม	57
3-9	ขนาดกำหนดหัวกดเชื่อมทั้งสองแบบในหน่วยมิลลิเมตร	58
3-10	เปรียบเทียบลักษณะสลักแกนหมุนกวนสองแบบ	58
3-11	ลักษณะหัวกดเชื่อมสองแบบผ่านการชุบแข็ง	58
3-12	ชุดอุปกรณ์วัดระยะความลึกการเชื่อม	59
3-13	โครงจับยึดและแกนวัดระยะซิมลิก	59
3-14	เครื่องกัดโลหะแกนตั้ง BEIJING รุ่น X5032	60
3-15	แสดงการปรับแนวขนานของชิ้นงานกับหัวกดเชื่อม	61
3-16	การตั้งศูนย์แนวเชื่อมด้วยเข็มวัด	61
3-17	แสดงการติดตั้งอุปกรณ์วัดความลึกหัวกดเชื่อม	62
3-18	แสดงการตั้งมุมเอียงหัวกดเชื่อม 2.5 องศา	62
3-19	ตำแหน่งเกียร์ปรับตั้งความเร็วเครื่องกัด	64
3-20	แสดงการตั้งค่าเครื่องมือก่อนการทดลอง	64
3-21	แสดงลักษณะการเชื่อมแบบเสียดทานแบบกวน	65
3-22	แสดงการถอดชิ้นงานหลังเชื่อมทดลอง	65
3-23	มาตรฐานการตัดชิ้นทดสอบรอยเชื่อมในหน่วยมิลลิเมตร	66
3-24	เครื่องเลื่อยสายพานสำหรับตัดชิ้นทดสอบงานเชื่อม	66
3-25	ขนาดกำหนดชิ้นทดสอบงานเชื่อมตามมาตรฐาน ASW D1.2	67
3-26	ชิ้นทดสอบแรงดึงงานเชื่อมที่เตรียมสำเร็จ	67
3-27	เครื่องทดสอบแรงดึง HUNG TA รุ่น HT-8339	68

3-28	แสดงการติดตั้งชิ้นทดสอบแรงดึงในปากจับ	68
3-29	แสดงการเตรียมชิ้นทดสอบด้วยการขึ้นเรือนแบบเย็น	69
3-30	แสดงการปรับแต่งระนาบชิ้นงานด้วยเครื่องกลึง	70
3-31	แสดงเครื่องขัดเตรียมโครงสร้างตัวอย่าง	71
3-32	กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสำหรับงานโลหะ	71
3-33	เครื่องทดสอบความแข็ง STARTEC รุ่น SMV-1000	72
3-34	แสดงจุดกดทดสอบค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อม	72
4-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชื่อมกับแรงดึงสูงสุด	83
4-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดึงสูงสุด	84
4-3	ผลกระทบทางความร้อนที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 950 รอบต่อนาที	86
4-4	ผลกระทบทางความร้อนที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1,180 รอบต่อนาที	86
4-5	แสดงตำแหน่งวิเคราะห์ทางโลหะวิทยาระดับจุลภาค	87
4-6	โครงสร้างรอยเชื่อม R-H600 บริเวณส่วนเอและอีกำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	88
4-7	โครงสร้างรอยเชื่อม R-H600 บริเวณส่วนบีกำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	88
4-8	โครงสร้างรอยเชื่อม R-H600 บริเวณส่วนซีกำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	89
4-9	โครงสร้างรอยเชื่อม R-H600 บริเวณส่วนดีกำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	89
4-10	โครงสร้างรอยเชื่อม R-L600 บริเวณส่วนเอและอีกำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	90
4-11	โครงสร้างรอยเชื่อม R-L600 บริเวณส่วนบีกำลังขยาย 400 100 และ 50	90
4-12	โครงสร้างรอยเชื่อม R-L600 บริเวณส่วนซีกำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	91
4-13	โครงสร้างรอยเชื่อม R-L600 บริเวณส่วนดีกำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	91
4-14	ค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยสลักแกนหมุนกวนผิวเรียบปลายมน	92
4-15	ค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยสลักแกนหมุนกวนผิวเกลียวปลายตัด	92
ภ-1	โครงสร้างจุลภาค R-L475 กำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	127
ภ-2	โครงสร้างจุลภาค R-L600 กำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	128
ภ-3	โครงสร้างจุลภาค R-L750 กำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	129
ภ-4	โครงสร้างจุลภาค R-H475 กำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	130
ภ-5	โครงสร้างจุลภาค R-H600 กำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	131
ภ-6	โครงสร้างจุลภาค R-H750 กำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	132
ภ-7	โครงสร้างจุลภาค T-L475 กำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	133
ภ-8	โครงสร้างจุลภาค T-L600 กำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	134

ภ-9	โครงสร้างจุดภาค T-L705 กำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	135
ภ-10	โครงสร้างจุดภาค T-H475 กำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	136
ภ-11	โครงสร้างจุดภาค T-H600 กำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	137
ภ-12	โครงสร้างจุดภาค T-H750 กำลังขยาย 400 100 และ 50 เท่า	138

อักษรย่อและสัญลักษณ์

การเขียนรายงานการวิจัยเล่มนี้ได้มีการใช้อักษรย่อและสัญลักษณ์ เพื่อความกระชับและให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจในการบรรยายเนื้อความ ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ทางเคมีหรือที่นิยมใช้กันในงานวิจัยก่อนหน้านี้และที่ได้กำหนดขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับการเขียนรายงานวิจัยในครั้งนี้ ดังนี้

ลักษณะ	ความหมาย
FSW	เทคนิคการเชื่อมโลหะด้วยแรงเสียดทานแบบหมุนกวน
MIG	การเชื่อมแบบหลอมละลายที่อาร์คด้วยลวดเชื่อม ปกคลุมด้วยก๊าซเฉื่อย
TIG	การเชื่อมแบบหลอมละลายที่อาร์คด้วยทังสเตน ปกคลุมด้วยก๊าซเฉื่อย
6061-T6	กลุ่มอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน
R	ชิ้นงานด้านที่ถูกกวนให้เนื้อออก อยู่ด้านขวามือ เมื่อหัดกดเชื่อม
A	ชิ้นงานด้านที่ถูกกวนเนื้อเข้ามาเพิ่ม อยู่ด้านซ้ายมือ เมื่อหัดกดเชื่อม
HAZ	บริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนจากการเชื่อมทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนไป (Heat Affected Zone)
TMAZ	บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากอิทธิพลทางความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีเชิงกล (Thermo Mechanically Affected Zone)
$\alpha=2.5^\circ$	มุมเอียงของหัวกดเชื่อม 2.5 องศา เทียบกับชิ้นงาน
C	ธาตุคาร์บอนที่ผสมในเหล็กกล้า (Carbon)
wt%	ส่วนผสมคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
AIISI	สมาคมเหล็กและเหล็กกล้าแห่งอเมริกา (The American Iron and Steel Institute)
TWI	สถาบันวิจัยเทคโนโลยีการเชื่อมของอังกฤษ(The Welding Institute)
O1 O6 และO7	กลุ่มเหล็กเครื่องมืองานเย็นที่ชุบแข็งด้วยน้ำมัน ที่นิยมใช้งาน

A2 A6 A8 และ A10	กลุ่มเหล็กเครื่องมืองานเย็นที่ชุบแข็งด้วยลม ที่นิยมใช้งาน
D2 D3 D4 และ D7	กลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น ที่มีธาตุคาร์บอน โครเมียม และโมลิบดีนัม ผสมในเปอร์เซ็นต์สูง ที่นิยมใช้งาน
DT	การทดสอบสมบัติเชิงกลแบบทำลายสภาพวัสดุ (Destructive Test)
ASTM	ข้อกำหนดมาตรฐานของอเมริกา (American Society of Testing and Materials)
BS	ข้อกำหนดมาตรฐานของอังกฤษ (British Standards)
JIS	ข้อกำหนดมาตรฐานของญี่ปุ่น (Japanese Industrial Standards)
AWS D17.3/D17.3M:200X	มาตรฐานงานเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยด้วยการเชื่อมแรงเสียดทาน ตามมาตรฐานของอเมริกา (American Welding Society)
AWS D1.2	มาตรฐานงานเชื่อมโครงสร้างอะลูมิเนียมแบบหลอมละลายตาม มาตรฐานของอเมริกา (American Welding Society)
σ	ค่าความเค้นทางวิศวกรรม
MPa	เมกะปาสกาล หน่วยความเค้นทางวิศวกรรมในระบบเอสไอ (SI unit) 1 MPa มีค่าเท่ากับ 10^6N/m^2
ϵ	ค่าความเครียดทางวิศวกรรมเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย มักให้หน่วย เปอร์เซ็นต์ความเครียด (percent strain) หรือ เปอร์เซ็นต์ความยืด (percent elongation)
%E	ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นทดสอบแรงดึง
HV	สัญลักษณ์หน่วยค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Hardness of Vickers Hardness Testing)
HV0.2/10	ค่าความแข็งวิธีวิกเกอร์สใช้ค้อน 1.961 นิวตัน เวลากดนาน 10 วินาที
Al_2O_3	ผงขัดอะลูมิเนียมออกไซด์ สำหรับเตรียมผิวทดสอบทางโลหะวิทยา
Si_2O_3	ขัดผิวมัน ด้วยสารแขวนลอยซิลิกาออกไซด์
HCL	กรดไฮโดรคลอริก
HNO_3	กรดไนตริก
HF	กรดไฮโดรฟลูออริก
FeCl_3	กรดเฟอร์ริกคลอไรด์
NaOH	โซเดียมไฮดรอกไซด์
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง

OM	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ในงานโลหะ
d_1 และ d_2	ความยาวของเส้นทแยงมุมรอยกดทดสอบความแข็งวิธีวิกอร์ส
R-LXXX	การทดสอบด้วยสลักแกนหมุนกวนแบบผิวเรียบปลายมน ด้วยความเร็วรอบ 950 รอบต่อนาที
R-HXXX	การทดสอบด้วยสลักแกนหมุนกวนแบบผิวเรียบปลายมน ด้วยความเร็วรอบ 1,180 รอบต่อนาที
T-LXXX	การทดสอบด้วยสลักแกนหมุนกวนแบบผิวเกลียวปลายตัดด้วยความเร็วรอบ 950 รอบต่อนาที
T-HXXX	การทดสอบด้วยสลักแกนหมุนกวนแบบผิวเกลียวปลายตัดด้วยความเร็วรอบ 1,180 รอบต่อนาที
P	รอยเชื่อมประสานติดกันได้สมบูรณ์ ผิวรอยเชื่อมเรียบเป็นมัน ไม่พบข้อบกพร่อง (Pass)
F	รอยเชื่อมประสานไม่ติดกันหรือไม่สมบูรณ์ ผิวรอยเชื่อมหยาบ พบข้อบกพร่อง (Fail)
C ^o	หน่วยวัดอุณหภูมิองศาเซลเซียส