

ภาคผนวก ก
ผลงานที่ผ่านการเผยแพร่

- [1] ปราโมทย์ พูนนายนม ประกช สิริสุวัฒน์ ศักดิ์ชัย จันทะศรี นิธิรัตน์ โพธิ์ทอง และ กิตติพงษ์ กิมะ พงศ์ “การเปลี่ยนแปลงสมบัติโลหะเชื่อมอลูมิเนียม 6063-T1 ด้วยตัวกวนการเชื่อมเสียดทานแบบ กวนหลายรูปแบบ” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2552, 21-22 ตุลาคม, ขอนแก่น, หน้า 1056-1061.

การเปลี่ยนแปลงสมบัติโลหะเชื่อมอลูมิเนียม 6063-T1 ด้วยตัวกวนการเชื่อมเสียด ทานแบบกวนหลายรูปแบบ

ปราโมทย์ พูนนายม^{1*} ประกช สิริสุวณณ์¹ ศักดิ์ชัย จันทะศรี¹ นิธิรัตน์ โพธิ์ทอง¹ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์¹
¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
E-mail: pp_mote@yahoo.com^{*}

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์หลัก เพื่อทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมอลูมิเนียม 6063-T1 ด้วยตัวกวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน 4 รูปแบบ คือ ทรงกระบอกผิวเกลียวหมุนตามเข็มนาฬิกา ทรงกระบอกผิวเกลียวหมุนทวนเข็มนาฬิกา ทรงกรวยผิวเกลียวหมุนตามเข็มนาฬิกา และทรงกรวยผิวเกลียวหมุนทวนเข็มนาฬิกา ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียม 6063-T1 ความหนา 6.3 มม. ด้วยตัวกวนที่ออกแบบไว้ทั้ง 4 รูปแบบทำให้เกิดรอยต่อที่สมบูรณ์ ไม่เกิดจุดบกพร่องใดๆ เกิดขึ้น ตัวกวนรูปร่างต่างๆ ทำให้เกิดค่าความแข็งแรงดึงที่แตกต่างกัน ตัวกวนที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 192 MPa คือ ตัวกวนทรงกระบอกผิวเกลียวหมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วรอบตัวกวน 2000 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min และความเอียงของตัวกวน 2 องศา ที่ความเร็วรอบที่เหมาะสม คือ 75-150 mm/min ค่าความแข็งแรงของโลหะเชื่อมมีค่าสูงกว่าโลหะอลูมิเนียมที่ค่าประมาณ 1-5% โครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมมีความแตกต่างตามรูปแบบของตัวกวน โลหะเชื่อมที่มีวงแหวนรอยเชื่อมทั้งหมดทั้งแนวความหนาของแผ่นอลูมิเนียมแสดงค่าความแข็งแรงสูงกว่าโลหะเชื่อมที่มีวงแหวนรอยเชื่อมบางส่วน เม็ดเกรนอลูมิเนียมมีการลดขนาดในโลหะเชื่อม และทำให้แนวเชื่อมมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าโลหะอลูมิเนียม

คำสำคัญ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน, ความแข็งแรง

ดึง, อลูมิเนียม, โครงสร้างจุลภาค, ตัวกวน

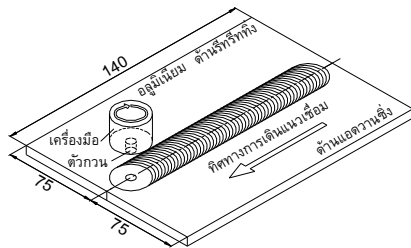
1. บทนำ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน เป็นกระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็ง ที่มีการใช้งานเพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย เช่น อลูมิเนียมผสม [1-2] มีขั้นตอนการเชื่อม คือ ตัวกวนที่หมุนด้วยความเร็วสูงถูกสอดลงเข้าไปในรอยต่อของวัสดุ จนกระทั่งปาดเครื่องมือเชื่อมสัมผัสกับผิวของรอยต่อ ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผิวของตัวกวนและปาดของเครื่องมือกับเนื้อวัสดุรอบๆ ตัวกวน ทำให้วัสดุเคลื่อนที่รอบๆ ตัวกวน และหรือเกิดการกวนภายในได้บ้าง ขึ้น เมื่อตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่ ปาดด้านหลังของเครื่องมือเชื่อม จะกดอัด และผสมวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวกันต่อไป [2-3]

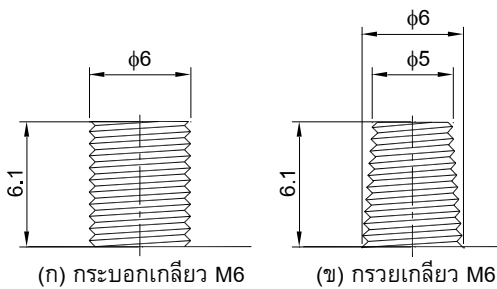
จากหลักการเบื้องต้น ตัวกวนที่สอดเข้าไปในรอยต่อเป็นตัวแปรสำคัญ ที่ทำให้เกิดการรวมตัวของวัสดุที่ดี การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของตัวกวนที่ใช้ในการเชื่อมรอยต่อ จะทำให้ได้คุณลักษณะและความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน ที่ผ่านมามีการออกแบบรูปร่างตัวกวนหลายแบบเพื่อทำการเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียมผสม เช่น ตัวกวนเกลียวขวา [4-5] หรือ ตัวกวนรูปร่างหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส เกลียววนขวา และเกลียววนซ้าย [6] หรือตัวกวนเกลียววนขวาทรงกระบอกและทรงกรวย [7] ซึ่งทำให้เกิดรอยต่อที่มีความแข็งแรงสูงกว่าโลหะหลัก ในกรณีของรอยต่ออลูมิเนียม 6063-T1 นั้น ผลการทดลองที่

ผ่านมาได้ยืนยันคำกล่าวข้างต้นว่า ตัวกวนรูปร่างต่างๆ สามารถทำให้เกิดความสมบูรณ์ของรอยต่อ และแสดงค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าโลหะหลัก [8-9] อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานไม่ได้เกิดการพังทลายที่โลหะเชื่อม ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้ จึงมีจุดประสงค์ในการศึกษาสมบัติของโลหะเชื่อมอลูมิเนียม 6063-T1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบตัวกวน เพื่อเป็นข้อมูลในการประยุกต์ใช้งานในอนาคตต่อไป

2. วิธีการทดลอง



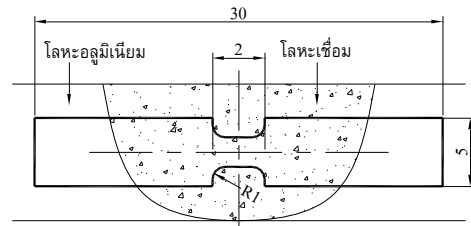
รูปที่ 1. มิติของรอยต่อชน (หน่วย: มม.)



รูปที่ 2. รูปร่างตัวกวน (หน่วย: มม.)

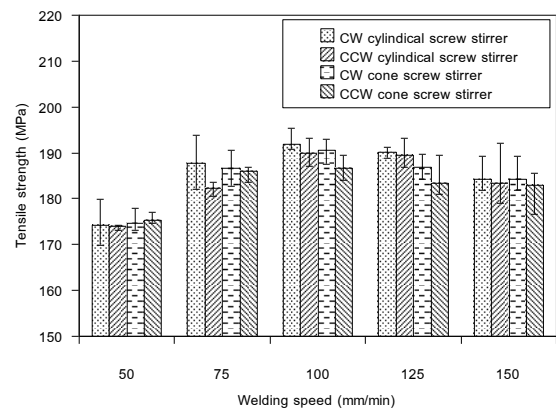
วัสดุในการทดลอง คือ อลูมิเนียมผสมเกรด 6063-T1 (Al-5.0%Mg-0.05%Mn-0.01%Cr-0.02%Cu โดยน้ำหนัก) หนา 6.3 มม. ที่มีความแข็งแรงดึงสูงสุดประมาณ 185 MPa เมื่อทำการทดสอบดึงตามแนวรัศมี แผ่นอลูมิเนียมถูกเตรียมให้มีขนาดยาว 140 มม. และกว้าง 75 มม. แผ่นอลูมิเนียมถูกนำมาประกอบเป็นรอยต่อชนดังแสดงในรูปที่ 1 และยึดแน่นบนอุปกรณ์จับยึด ก่อนยึดแน่นอีกครั้งบนแท่นเครื่องกัด เครื่องมือเชื่อมทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD11 มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกเกลียว M6 และทรงกรวยเกลียว M6 วนขวาและซ้าย ทิศทางในการหมุนตามและทวนเข็มนาฬิกา โดยมีขนาดและรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2 ความเร็วรอบของตัวกวนมีค่า 2000 rpm ความเร็วของการเดินแนวเชื่อมไปตามแนวต่อชนมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 50 ถึง

150 mm/min ความเอียงของตัวกวน 2° เมื่อทำการเชื่อมเสร็จสมบูรณ์ ชิ้นงานเชื่อมถูกนำมาทำการเตรียมชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 3 แนวเชื่อมบริเวณกึ่งกลางตามทิศทางการเดินแนวเชื่อมถูกตัดและตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเชื่อม เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมและเปรียบเทียบกับความต้านทานแรงดึงต่อไป

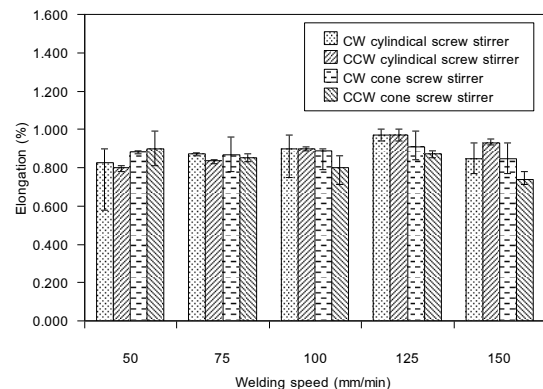


รูปที่ 3. มิติของชิ้นทดสอบแรงดึง (หน่วย: มม.)

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์



รูปที่ 4. ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ความเร็วเดินแนวเชื่อม และรูปแบบตัวกวน

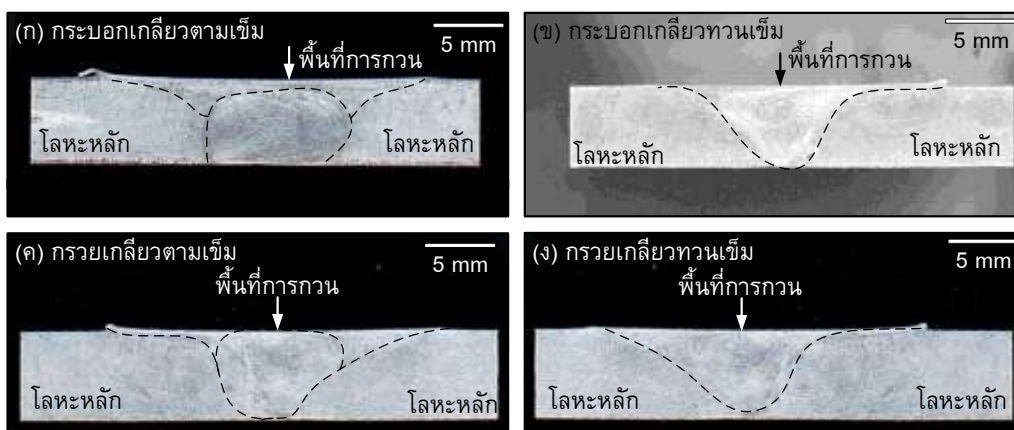


รูปที่ 5. ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืดตัว ความเร็วเดินแนวเชื่อม และรูปแบบตัวกวน

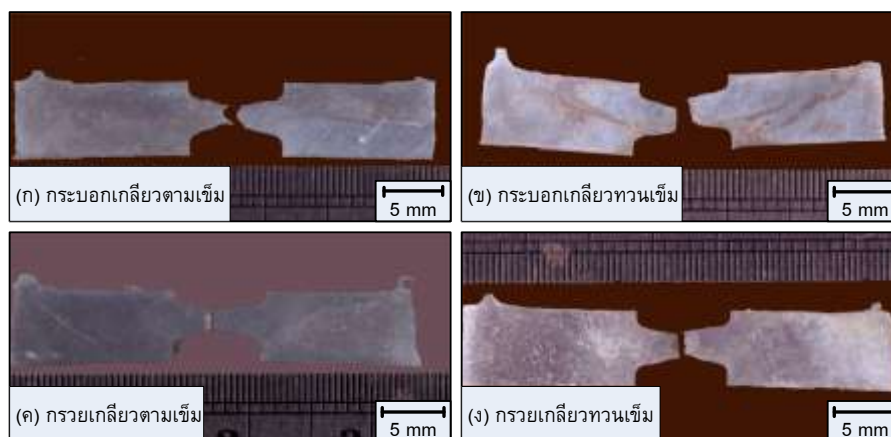
รอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1 ถูกเชื่อมด้วยตัวแปร การเชื่อมที่กำหนด และได้ทำการตรวจสอบความแข็งแรง ดึงของรอยต่อ โดยกำหนดให้ชิ้นทดสอบแรงดึงมีขนาด และมิติอ้างอิงตาม AWS D1.2 ผลการทดสอบ พบว่า โลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียว และทรง กรวยเกลียวที่ได้นั้นมีค่าความแข็งแรงกว่าโลหะที่ใช้เชื่อม คือ แผ่นอลูมิเนียม 6063-T1 [8-9] เพื่อให้ทราบค่าความ แข็งแรงของโลหะเชื่อม คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการตรวจสอบ สมบัติของโลหะเชื่อมอีกครั้ง ด้วยวิธีการที่ได้ออกแบบไว้ ในหัวข้อที่ผ่านมา และได้ผลการทดลองดังนี้

รูปที่ 4 และ 5 แสดงผลการทดสอบแรงดึงของโลหะ เชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทั้ง 4 ชนิดที่ออกแบบไว้ พบว่า ค่าความแข็งแรงของโลหะเชื่อม มีค่าที่แตกต่างกันตามรูป แบบตัวกวน ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำ คือ 50 mm/min นั้น ความแข็งแรงของรอยต่อที่ได้มีค่าต่ำกว่าความแข็งแรง

แรงดึงของโลหะอลูมิเนียมหลักที่มีค่าเฉลี่ย 180 MPa ประมาณ 1-3% อย่างไรก็ตามค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ของแนวเชื่อมที่ความเร็วรอบต่ำนี้ มีค่าที่ไม่แตกต่างจาก ความเร็วเดินแนวเชื่อมอื่นมากนักดังแสดงในรูปที่ 5 การ ลดลงของค่าความแข็งแรงนี้ คาดว่าเกิดขึ้นจากความเร็ว เดินแนวเชื่อมที่มีค่าต่ำนั้น ทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นใน แนวเชื่อมและทำให้แนวเชื่อมเกิดการคลายตัวขึ้น ดังเห็น ได้จากค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของแนวเชื่อม ที่เชื่อมด้วยตัว กวนทรงกระบอกเกลียวหมุนทวนเข็ม ที่มีค่าความแข็งแรง ของแนวเชื่อมที่ค่าประมาณ 72HV ซึ่งเป็นค่า ที่ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะเชื่อม ที่ให้ค่าความแข็งแรงสูง กว่าที่ค่าความเร็วเดินแนวเชื่อม 75-150 mm/min ที่มีค่า ประมาณ 75-80HV



รูปที่ 6. โครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนต่างๆ ที่ความเร็วเดินแนว 100 mm/min



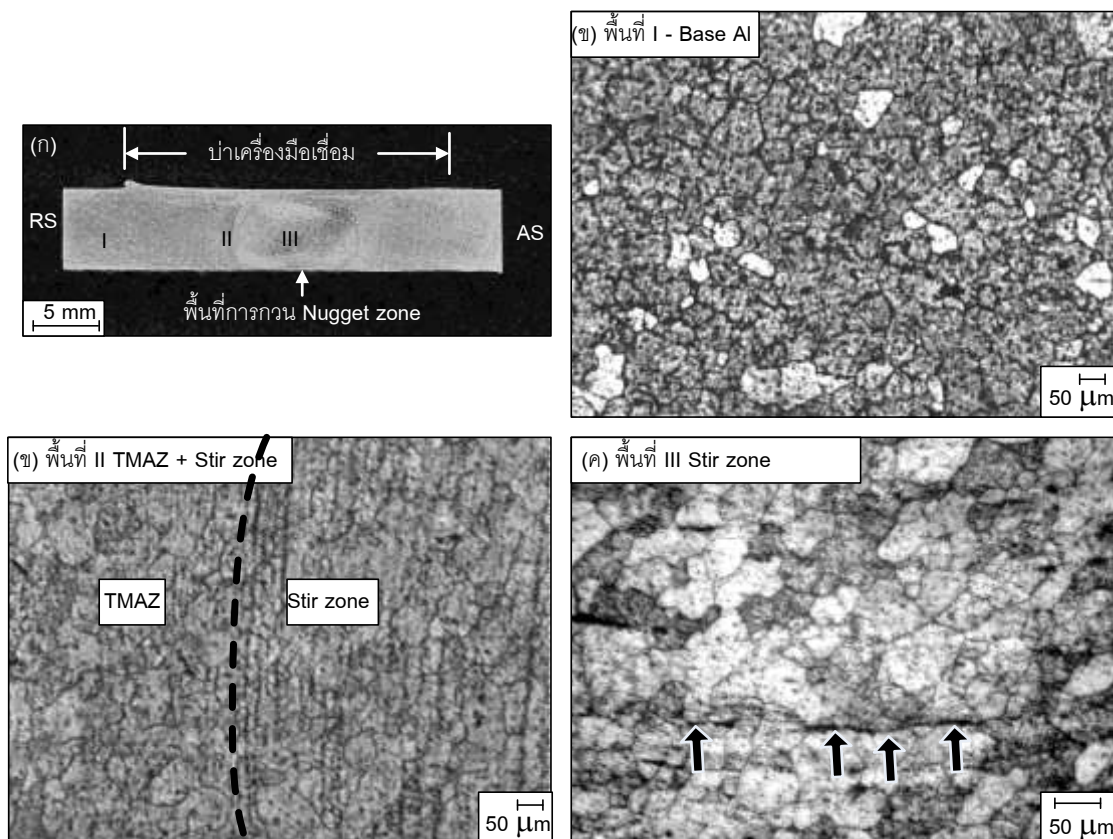
รูปที่ 7. ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึง

เมื่อความเร็วเดินแนวเพิ่มขึ้นจาก 75-100 mm/min ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าสูงกว่าโลหะหลักที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1-5% โดยความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 192 MPa เมื่อทำการเชื่อมด้วยตัวกวนกระบอกเกลียวหมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min จากนั้นค่าความแข็งแรงดึงมีค่าลดลงเมื่อความเร็วเดินแนวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 100-150 mm/min ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงดึงนี้ คาดว่าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของโลหะเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 8 ตามลำดับ

โครงสร้างมหภาคโลหะเชื่อมที่ได้จากตัวกวนทั้ง 4 แบบที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min ที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดในแต่ละตัวกวนดังแสดงในรูปที่ 6 สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ โครงสร้างมหภาคที่มีรูปร่างเป็นวงหัวหอม (Onion ring) ที่เป็นลักษณะโครงสร้างมหภาคที่แสดงการเกิดการไหลวนเข้ากันอย่างดีของโลหะผสมรอบๆ ตัวกวน เมื่อตัวกวนเกิดการหมุนรอบตัวเองและเคลื่อนที่และมักแสดงค่าความแข็งแรงสูง [10] พบได้ภายในโลหะเชื่อมดังแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 6 (ก) และ (ค) เมื่อเชื่อมด้วยตัวกวนกระบอกเกลียวหมุนตามเข็มนาฬิกา และทรงกรวยเกลียวหมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมรอยต่อ และหนึ่งรูปแบบโครงสร้างมหภาคที่พบ มีลักษณะเป็นวงแหวนหัวหอมซ้อนวางบนทรงกรวยดังแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 6 (ข) และ (ง) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบความแข็งแรงดึงโลหะเชื่อมในรูปที่ 4 และ 5 ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min แล้วพบว่าหากแนวเชื่อมที่ได้ มีการเกิดวงหัวหอมตลอดทั้งความหนาของภาคตัดในทิศทางตั้งฉากกับแนวเชื่อมแล้ว ค่าความแข็งแรงของโลหะเชื่อม จะมีค่าสูงกว่ารอยต่อที่ภายในโลหะเชื่อมมีการเกิดวงหัวหอมที่วางซ้อนอยู่ในกรวย ผลการทดลองที่ได้นี้ส่งผลต่อรูปแบบของการพังทลายของชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 7 ความแข็งแรงของชิ้นทดสอบดึงเชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียวหมุนตามเข็มนาฬิกา นั้น มีรูปแบบการพังทลายแบบถ้วยและกรวย (Cup and cone fracture) [11] ที่บริเวณกึ่งกลางของช่วงความยาวเกจขึ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) ขณะที่รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบ ที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียว และกรวยเกลียวหมุนทวนเข็มนาฬิกา แนวการพังทลายมีลักษณะเป็นเส้นตรง การฉีกขาดแบบถ้วยและกรวยที่เกิดขึ้นนี้ ยืนยันผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4 และ 5 ว่า

โลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกเกลียว และกรวยเกลียวหมุนตามเข็มนาฬิกา มีความแข็งแรงดึงและค่าการยึดตัวของโลหะเชื่อมสูงกว่าตัวกวนทรงกระบอกเกลียว และกรวยเกลียวที่มีทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา

รูปที่ 8 (ก) แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยต่อเชื่อมอลูมิเนียม 6063-T1 ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min ความเอียง 2 องศา และตัวกวนทรงกระบอกผิวเกลียว ที่มีทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อมเรียกว่า “พื้นที่การกวน (Stir zone)” พบอลูมิเนียมล้วนเป็นวง พื้นที่นี้เรียกว่า “พื้นที่นั้กเกิด (Nugget zone)” ซึ่งเป็นพื้นที่การกวนรุนแรง และอลูมิเนียมที่อ่อนตัวจากความร้อนเสียดทาน ถูกตัดเฉือน และอัดอย่างรุนแรงเข้าด้วยกัน บริเวณพื้นที่นี้รูปแบบของเม็ดเกรนจะเกิดการก่อตัวขึ้นใหม่ (Dynamic Recrystallization) และมีขนาดเล็กกลมมนขึ้น [4] ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค บริเวณที่มีความแตกต่างบนโครงสร้างมหภาคที่ตำแหน่ง I ถึง III มีรายละเอียดดังนี้ รูปที่ 8 (ข) แสดงพื้นที่ I โครงสร้างจุลภาคของโลหะหลักอลูมิเนียมผสม 6063-T1 ที่รูปร่างของเม็ดเกรนที่ไม่เป็นระเบียบและไม่กลมมน ทำการวัดขนาดเกรนด้วยวิธีการลากเส้นตัดผ่านเกรน (Linear Interception) พบว่ามีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 33.99 μm จุดที่ II คือ ขอบเขตระหว่างพื้นที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนและแรงทางกล (Thermo-mechanical Affected Zone: TMAZ) [4,10,12] ซึ่งเป็นพื้นที่เกิดการปรับสภาพเนื่องจากความร้อนเสียดทานและแรงกวนอลูมิเนียม ทำให้เม็ดเกรนด้านซ้ายของเส้นประนั้นมีรูปร่างกลมมน และเป็นระเบียบมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะหลักอลูมิเนียม ขณะที่ด้านขวาของเส้นประในรูปที่ 8 (ค) เม็ดเกรนโดนกดและอัดให้มีความหนาที่เล็กลง และแสดงแนวของชั้นวงหัวหอมที่เกิดจากการกดอัดของแนวเกลียวของตัวกวนเกิดขึ้นขนานกับแนวเส้นประจากบนลงล่าง รูปที่ 8 (ง) หรือจุดที่ III คือ พื้นที่การกวนที่อลูมิเนียมก่อตัวของเกรนใหม่ [4] ที่ละเอียดและกลมมน ภายในโลหะเชื่อมบริเวณพื้นที่การกวนที่ตรวจสอบนี้ พบการแบ่งแยกโครงสร้างจุลภาคถูกแยกออกเป็นชั้นๆ ด้วยวงหัวหอมดังแสดงด้วยลูกศรสีดำในรูปที่ 8 (ง) แนวเส้นสีดำนี้คาดว่าเป็นแนวเสริมแรงที่ทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงสูงขึ้น เนื่องจากมีค่าความแข็งแรงประมาณ 85HV อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาต่อไป



รูปที่ 8. โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกหมุนตามเข็มนาฬิกา ความเร็วรอบ 2000 rpm และ ความเร็วเดิน 100 mm/min

5. สรุป

รอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1 ถูกเชื่อมด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนโดยใช้ตัวกวน 4 รูปแบบ คือ ตัวกวนทรงกระบอกเกลียวหมุนตามและทวนเข็มนาฬิกา และตัวกวนทรงกรวยเกลียวหมุนตามและทวนเข็มนาฬิกา ที่ค่าความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ และทำการศึกษสมบัติของโลหะเชื่อมที่ได้ ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้

- 5.1 การเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียม 6063-T1 ความหนา 6.3 มม. ด้วยตัวกวนที่ออกแบบไว้ทั้ง 4 รูปแบบทำให้เกิดรอยต่อที่สมบูรณ์ ไม่เกิดจุดบกพร่องใดๆ เกิดขึ้น
- 5.2 ตัวกวนรูปร่างต่างๆ ทำให้เกิดค่าความแข็งแรงดึงที่แตกต่างกัน ตัวกวนที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 192 MPa คือ ตัวกวนทรงกระบอกผิวเกลียวหมุนตามเข็มนาฬิกา ที่ความเร็วรอบตัวกวน 2000 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min

และความเอียงของตัวกวน 2 องศา

- 5.3 ที่ความเร็วรอบที่เหมาะสม คือ 75-150 mm/min ค่าความแข็งแรงของโลหะเชื่อมมีค่าสูงกว่าโลหะอลูมิเนียมที่ค่าประมาณ 1-5%
- 5.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมมีความแตกต่างตามรูปแบบของตัวกวน โลหะเชื่อมที่มีวงหัวหอมตลอดทั้งแนวความหนาของแผ่นอลูมิเนียมแสดงค่าความแข็งแรงสูงกว่าโลหะเชื่อมที่มีวงหัวหอมบางส่วน
- 5.5 โครงสร้างจุลภาคแสดงการลดขนาดของเม็ดเกรนอลูมิเนียมในโลหะเชื่อม และส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีค่าความแข็งแรง และการยึดตัวสูงกว่าโลหะอลูมิเนียม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยประจำปี 2552

เอกสารอ้างอิง

- [1] Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., Templesmith, P. and Dawes, C.J. 1991. Friction Stir Welding. G.B. Patent Appli. No. 9125978.8.
- [2] Thomas, W.M., Nicholas. 1997. FSW. for the Transport. Indus. Mater. & Des. 18: 269-273.
- [3] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์. 2551. การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน: วิธีการแก้ปัญหาการต่อวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมหลอมละลาย. การประชุมข่วงงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2551, สงขลา, ประเทศไทย, 20-22 ตุลาคม 2551, หน้า 712-717.
- [4] Li, Y., Murr, L.E. and McClure, J.C. 1999. Flow Visualization and Residual Microstructure associated with the Friction-stir Welding of 2024 Aluminum and 6061 Aluminum. Mater. Sci. and Eng. A271: 213-223.
- [5] Prado, R.A., Murr, L.E., Shindo, D.J. and Soto, K.F. 2001. Tool Wear in Friction-stir Welding of Aluminum Alloy 6061+20% Al_2O_3 : A Preliminary Study. Scripta Materialia. 45: 75-80.
- [6] Boz, M. and Kurt, A. 2004. The Influence of Stirrer Geometry on Bonding and Mechanical Properties in Friction Stir Welding Process. Mater. & Des. 25 (2004) 343-347.
- [7] Zhao, Y., Lin, S., Wu, L. and Qu, F. 2005. The Influence of Pin Geometry on Bonding and Mechanical Properties in Friction Stir Weld 2014 Al Alloy. Mater. Letters. 59: 2948-2952.
- [8] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์. 2551. อิทธิพลความเร็วเดินแนวของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา. 19-3: 47-51.
- [9] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, นราธิป แสงชัย และสงกรานต์ บางศรีนัยทิพย์. 2551. อิทธิพลรูปร่างตัวกวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อความต้านทานแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม AA6063-T1. วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสยาม. 9-17: 19-25.
- [10] Jata, K.V. and Semiatin, S.L. 2003. Continuous Dynamic Recrystallization during Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys. Scripta Mater. 43: 743-749.
- [11] Dieter, G.E. 1978. Mechanical Metallurgy. Singapore: McGraw-Hill, Inc.
- [12] Lee, W.B., Yeon, Y.M. and Jung, S.B. 2003. The Improvement of Mechanical Properties of Friction-stir-welded A356 Al Alloy. Materials Science and Engineering A. 355: 154-159.