

อิทธิพลความเร็วเดินแนวของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1

Effect of Friction Stir Welding Speed on Tensile Strength of AA6063-T1 Butt Joint

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

Kittipong Kimapong

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทร. 0-2549-3491 โทรสาร 0-2549-3442

E-mail: kittipong.k@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเร็วเดินแนวของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1 ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึง และโครงสร้างมหภาคที่แตกต่างกัน ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่า 110 MPa เมื่อทำการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 mm/min ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อมีค่าที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วเดินแนวเชื่อมที่สูงกว่าทำให้จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมมีขนาดที่เล็กลง อย่างไรก็ตามความเร็วเดินแนวเชื่อมที่สูงเกินไป เช่น 150-200 mm/min ทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณผิวหน้า และจุดบกพร่องขนาดใหญ่ที่บริเวณด้านแอดวานซ์ของรอยต่อ และส่งผลโดยตรงต่อการลดความแข็งแรงดึง โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อแสดงการเกิดเกรนใหม่ที่มีรูปร่างกลมมนและมีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างจุลภาคอลูมิเนียมหลัก

Abstract

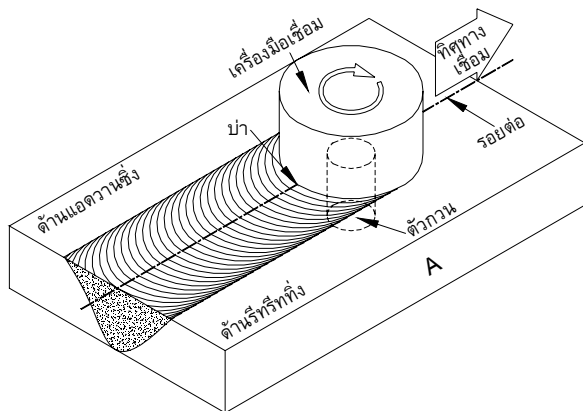
This paper aims to present the effect of Friction Stir Welding (FSW) speed on tensile strength of AA6063-T1 aluminum alloy butt joint. The main results obtained are as follows. The variation of a welding speed to produce the butt joint of aluminum alloy gave various tensile strengths and macrostructure of butt joints. The increase of the welding speed increased the tensile strength of the butt joint because the defect size that was formed in the weld decreased when the higher welding speed was applied. However, when the welding speed was too high such as 150-200 mm/min, the defect on the welding bead surface and the larger defect at the advancing side of the joint cross section were produced and decreased directly the joint tensile strength. The microstructure of the joint showed the re-crystallization grain that had

the round shape and smaller grain size when compared to the aluminum base materials.

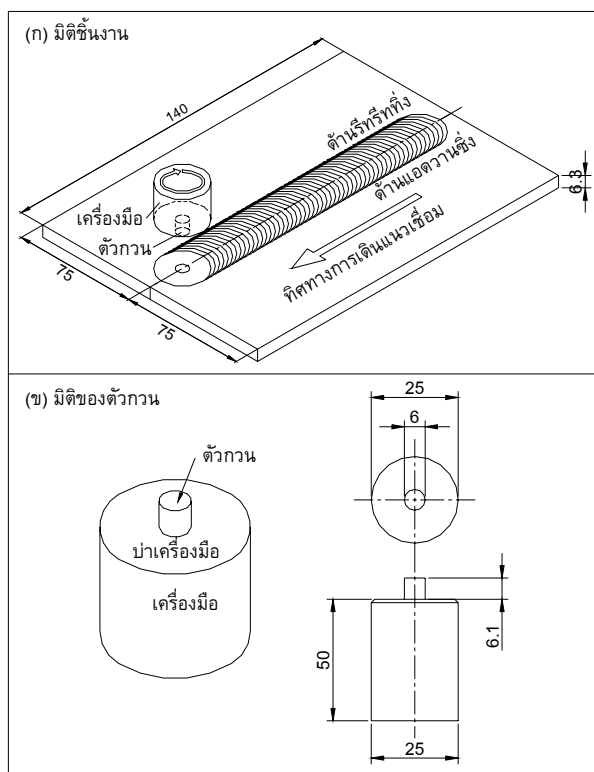
1. บทนำ

การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid State Welding) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย (Conventional Fusion Welding) เช่น อลูมิเนียมผสม [1] เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนสามารถทำให้กลสมบัติของแนวเชื่อมมีค่าสูงในบริเวณแนวเชื่อม (Welded Zone) กรรมวิธีการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนนี้ได้มีการประยุกต์ใช้อย่างมีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบิน รถยนต์ และเรือเดินสมุทร [2] และปัจจุบันเป็นกระบวนการเชื่อมที่ได้รับความสนใจในการทำวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติต่างๆ อย่างต่อเนื่อง ลักษณะกระบวนการเชื่อมแสดงไว้ในรูปที่ 1 ตัวกวน (Probe or Stirrer) ที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องมือเชื่อม (Rotating Tool) สอดลงเข้าไปในรอยต่อของวัสดุจนกระทั่งบ่า (Shoulder) ของเครื่องมือเชื่อมสัมผัสกับผิวของรอยต่อ ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผิวของตัวกวนและบ่าของเครื่องมือกับเนื้อวัสดุรอบๆ ตัวกวน ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวอยู่ในสภาวะคล้ายของไหล (Plastic Fluid-like State) และเคลื่อนที่รอบตัวกวนภายใต้บ่าของเครื่องมือเชื่อม วัสดุที่เคลื่อนที่รอบๆ ตัวกวนจะเกิดการเคลื่อนที่ด้านบนของรอยต่อ และเกิดการกดขึ้นลงมาเนื่องจากการกดของบ่าเครื่องมือทำให้วัสดุเกิดการไหลวน หรือเกิดการกวน (Stirring) ภายใต้บ่าขึ้น อย่างไรก็ตามคำจำกัดความในภาษาไทยในปัจจุบันยังไม่มีมีการกำหนดขึ้น ดังนั้นผู้เขียนจึงขอใช้คำว่า “การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน” เพื่อการอธิบายในบทความนี้เป็นเบื้องต้น ขั้นตอนต่อไปเมื่อวัสดุที่อ่อนตัวเกิดการไหลวนแล้ว และเมื่อตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่ วัสดุที่อ่อนตัวและเกิดการกวนอยู่ด้านหน้าของตัวกวนจะถูกถ่ายเทมาสู่ด้านหลังตาม

ทิศทางการหมุนของตัวกวนทางด้านรีทรีทิ่ง และบางส่วนจะไหลจากด้านหลังสู่ด้านหน้าทางด้านแอดวานซ์ (ด้านรีทรีทิ่ง คือ ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนสวนทางกับทิศทางการเชื่อม ขณะที่ด้านแอดวานซ์ คือ ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนขนานกับทิศทางการเชื่อม) จากนั้นเมื่อวัสดุส่งผ่านรอบๆ ตัวกวนและตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านหลังของเครื่องมือเชื่อม จะกดอัด และผสมวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นแนวเชื่อม



รูปที่ 1 การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน

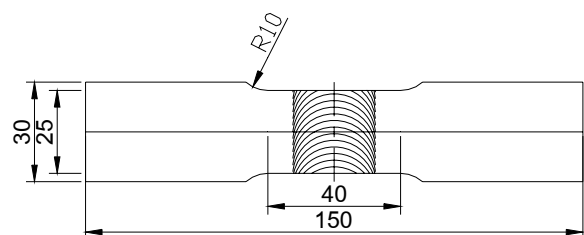


รูปที่ 2 (ก) มิติของชิ้นงาน และ (ข) มิติของเครื่องมือเชื่อม (หน่วย: มม.)

ที่ผ่านมามีการประยุกต์ใช้การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ในการเชื่อมอลูมิเนียมเกรดต่างๆ ด้วยตัวกวนรูปร่างต่างๆ มากมาย เช่น การเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียมผสม A356 [3] อลูมิเนียมเกรด AA2014-T351 [4] อลูมิเนียมเกรด AA5083 [5] อลูมิเนียมเกรด AA6082 [6] อลูมิเนียมผสม Al-Li-Cu [7] เป็นต้น และการศึกษาเหล่านี้ได้รายงานความแข็งแรงของรอยต่อชนมีค่าสูงกว่าอลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุหลักในงานเชื่อม อย่างไรก็ตามในกรณีของอลูมิเนียมเกรด 6063-T1 ซึ่งเป็นอลูมิเนียมที่สามารถผลิตและใช้งานในประเทศไทยนั้นไม่ได้มีรายงานไว้ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีจุดมุ่งหมายในการประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนในการเชื่อมรอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรดนี้ โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกมาตรฐานซึ่งเป็นรูปร่างตัวกวนที่ใช้ในการเชื่อมทั่วไปและตัวกวนแบบอื่นๆ และเปรียบเทียบกับโครงสร้างมหภาคของรอยต่อต่อไป

2. วิธีการทดลอง

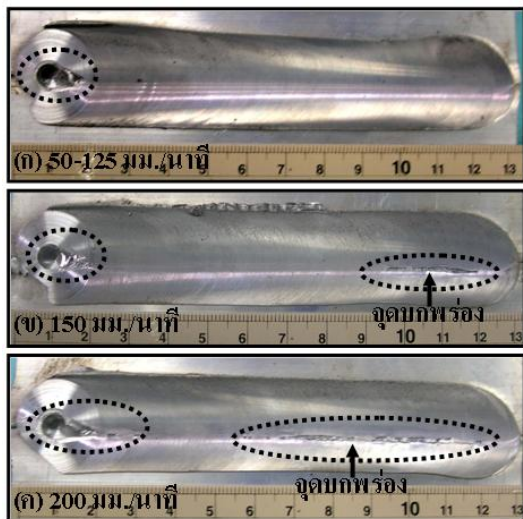
วัสดุในการทดลอง คือ อลูมิเนียมผสมเกรด 6063-T1 (94.7%Al-0.4%Mg-0.05%Mn-0.01%Cr-0.02%Cu โดยน้ำหนัก) หนา 6.3 มม. ที่มีความแข็งแรงดึงสูงสุดประมาณ 210 MPa แผ่นอลูมิเนียมถูกเตรียมให้มีขนาดยาว 140 มม. และกว้าง 75 มม. แผ่นอลูมิเนียมถูกประกอบเป็นรอยต่อชนดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) และยึดแน่นบนอุปกรณ์จับยึด (Jig) ก่อนยึดแน่นอีกครั้งบนแท่นเครื่องกัด เครื่องมือเชื่อมทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD11 มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของป่าเครื่องมือมีค่าเท่ากับ 25 มม. ตัวกวนทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 มม. ยาว 6.1 มม. ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) ความเร็วรอบของตัวกวนมีค่า 1000 rpm ความเร็วของการเดินแนวเชื่อมไปตามแนวต่อชนมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 50 ถึง 200 mm/min เมื่อทำการเชื่อมเสร็จสมบูรณ์ ชิ้นงานเชื่อมถูกนำมาทำการเตรียมชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน AWS D1.2 ดังแสดงในรูปที่ 3 แนวเชื่อมบริเวณกึ่งกลางตามทิศทางการเดินแนวเชื่อมถูกตัดและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเชื่อมเพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมและเปรียบเทียบกับความต้านทานแรงดึงต่อไป



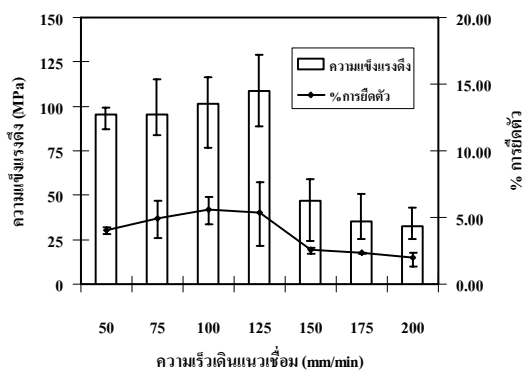
รูปที่ 3 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึง (หน่วย: มม.)

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

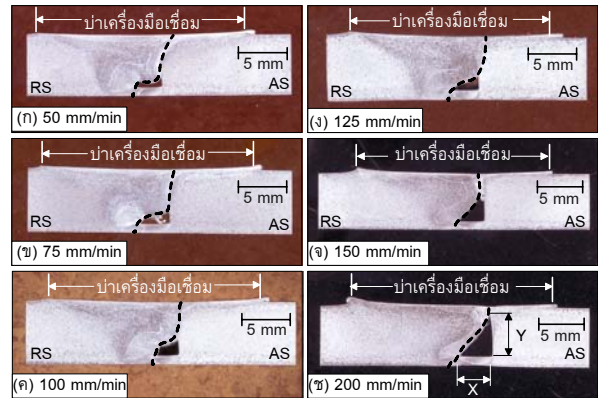
รูปที่ 4 แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมด้วยความเร็วรอบของตัวกวน 1000 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ พบว่าที่จุดสุดท้ายของแนวเชื่อมทุกๆ สภาวะปรากฏจุดบกพร่องเป็นรูปกลมดังแสดงในรูปพื้นที่เส้นประด้านซ้าย จุดบกพร่องลักษณะนี้เกิดที่ทุกๆ สภาวะของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนไม่สามารถกำจัดออกได้ แต่สามารถที่จะอุดรูช่องว่างนี้ได้ด้วยกระบวนการเชื่อมต่างๆ ต่อไป [8] ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ต่ำกว่า 125 mm/min แนวเชื่อมแสดงความสมบูรณ์ ไม่ปรากฏจุดบกพร่องเกิดขึ้นบนผิวหน้าแนวเชื่อม อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วในการเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น เช่น 150 ถึง 200 mm/min พบว่ามีความไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นดังแสดงในพื้นที่เส้นประในรูปที่ 4 ความไม่สมบูรณ์นี้มีขนาดความโตและความยาวเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นจนถึง 200 mm/min



รูปที่ 4 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1000 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ (หน่วยสเกล: ซม.)

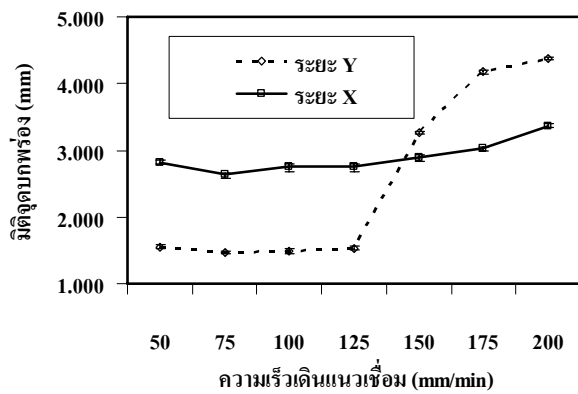


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเดินแนวเชื่อม ความแข็งแรงดึง และร้อยละการยึดตัว



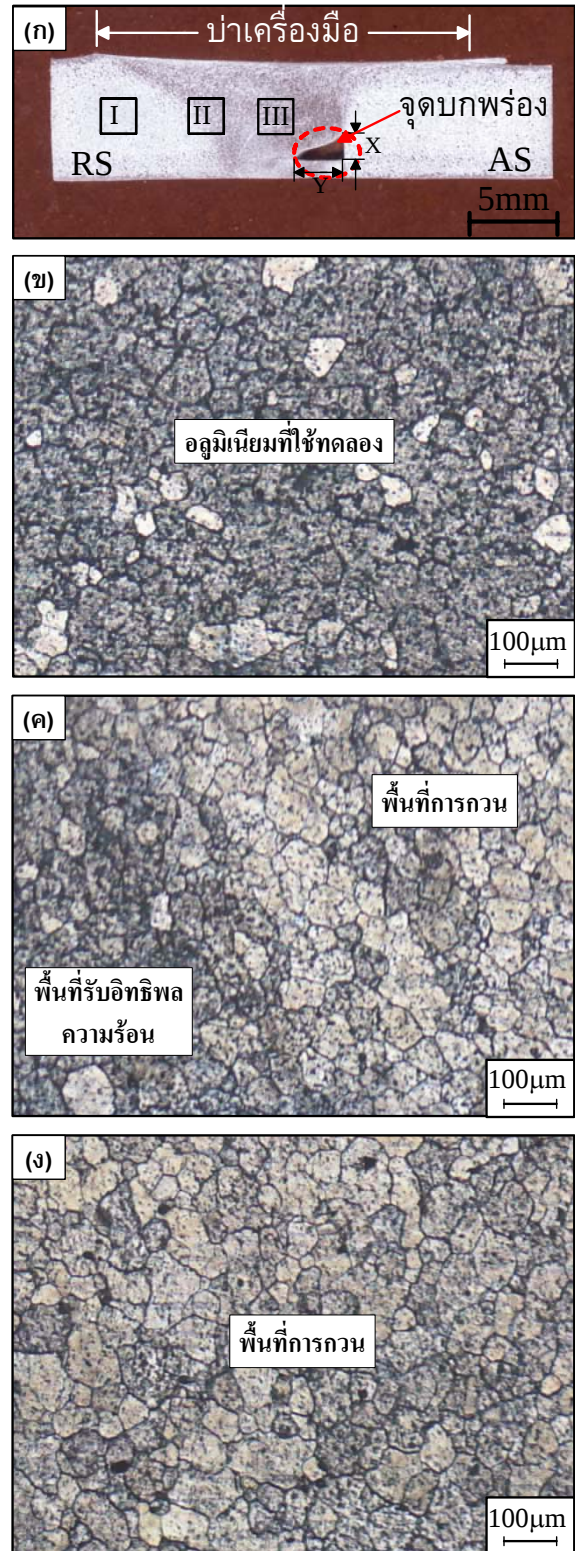
รูปที่ 6 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อชนที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ เส้นประแสดงแนวการฉีกขาดเมื่อทำการทดสอบแรงดึง (RS คือ ด้านรีทริง และ AS แสดงด้านแอดวานซ์)

รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึง และร้อยละการยึดตัวของชิ้นทดสอบ พบว่าความแข็งแรงดึงของชิ้นทดสอบและค่าร้อยละการยึดตัวของชิ้นทดสอบ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 50 ถึง 125 mm/min และค่าทั้งสองมีค่าลดลงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 150 ถึง 200 mm/min ค่าความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 mm/min แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดคือ 110 MPa เปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของอลูมิเนียมที่ใช้ในการศึกษามีค่าประมาณร้อยละ 50 พิจารณาโครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่ตัดในแนวทิศทางการดึงจากทิศทางการเดินแนวเชื่อม โดยทิศทางการเดินแนวเชื่อมพุ่งออกมาจากระนาบที่แสดง พบจุดบกพร่องเป็นโพรงในรอยต่อทุกๆ สภาวะ การฉีกขาดของชิ้นทดสอบแรงดึงนั้นเกิดขึ้นตามแนวของเส้นประที่ด้านแอดวานซ์ และลากผ่านจุดบกพร่องดังแสดงในรูปที่ 6 ทำการวัดขนาดความกว้าง (ระยะ X) และความสูง (ระยะ Y) ของจุดบกพร่องดังแสดงในรูปที่ 6 (ช) และแสดงผลในรูปที่ 7 พบว่ามีจุดบกพร่องที่ระยะ X และระยะ Y มีขนาดที่ลดลงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 125 mm/min และมีค่าขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น หากเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดของจุดบกพร่องและความแข็งแรงดึงแล้ว พบว่าขนาดของจุดบกพร่องส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของความแข็งแรงดึงของรอยต่อ จุดบกพร่องลักษณะนี้เกิดขึ้นลักษณะเดียวกันกับการเกิดในการเชื่อมรอยต่อชนอลูมิเนียมเกรด 2025 [7] และรอยต่อชนอลูมิเนียมเกรด 6063-T6 [9] ซึ่งเหตุผลการเกิดคาดว่าจะเกิดจากการเอียงตัวกวนที่ใช้ในการเชื่อมมีค่าน้อยเกินไป ทำให้เกิดการกวนอลูมิเนียมในแนวเชื่อมน้อยไป และส่งผลทำให้อลูมิเนียมที่อ่อนตัวเนื่องจากการเสียดทานกับผิวของตัวกวนไม่สามารถเต็มเต็มลงไปตำแหน่งดังกล่าวได้เพียงพอ [7] หากมีการเอียงตัวกวนเพิ่มมากขึ้น คาดว่าจะทำให้เกิดการกวนที่รุนแรงและเติมอลูมิเนียมลงไปในช่วงว่างจุดบกพร่องได้ต่อไป [10]



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงขนาดจุดบกพร่อง

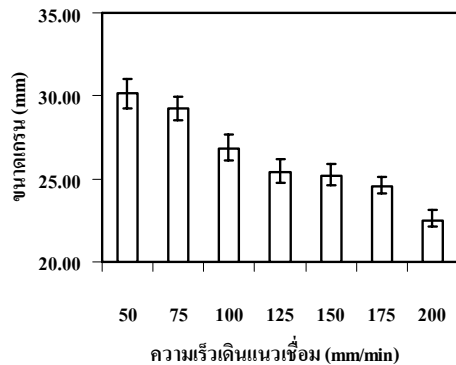
โครงสร้างมหภาคในรูปที่ 8 (ก) แสดงพื้นที่ที่เกิดการกวนและพื้นที่ของโลหะอูมิเนียมที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่ง I ถึง III และแสดงโครงสร้างจุลภาคดังแสดงในรูปที่ 8 (ข) ถึง (ง) ตามลำดับ โครงสร้างจุลภาคของอูมิเนียมหลักที่ใช้ในการเชื่อมบริเวณจุด I แสดงโครงสร้างเม็ดเกรนที่มีรูปร่างที่ไม่เป็นระเบียบและไม่กลมมน ทำการวัดขนาดเกรนด้วยวิธีการลากเส้นตัดผ่านเกรน (Linear Interception) ตามมาตรฐาน ASTM E112 [11] พบว่ามีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 33.99 ไมโครเมตร จุดที่ II คือขอบเขตระหว่างพื้นที่ที่รับอิทธิพลจากความร้อนจากการเชื่อม (Heat Affected Zone: HAZ) และพื้นที่ที่เกิดการกวนด้วยเครื่องมือเชื่อม ที่บริเวณพื้นที่รับอิทธิพลจากความร้อนจากการเชื่อมนั้นพบว่ายังคงขนาดและรูปร่างของเม็ดเกรนเหมือนดังอูมิเนียมหลัก คือ โครงสร้างเม็ดเกรนที่มีรูปร่างที่ไม่เป็นระเบียบ ไม่กลมมน ขณะที่บริเวณพื้นที่การกวนพบว่ารูปร่างและขนาดของเม็ดเกรนมีความกลมมนขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8 (ง) ทำการวัดขนาดเกรนพบว่ามีความกลมมนเฉลี่ย 25.42 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดเกรนในเนื้ออูมิเนียมหลัก เม็ดเกรนที่มีความละเอียดและรูปร่างที่กลมมนขึ้นนี้เกิดจากกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนนี้ก่อให้เกิดผลึกเกรนใหม่ (Dynamic Recrystallization) ของอูมิเนียมขึ้น [6] อย่างไรก็ตามการตรวจสอบการก่อผลึกเกรนใหม่นี้ไม่ได้รายงานไว้ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการเปรียบเทียบขนาดเม็ดเกรนบริเวณพื้นที่ที่ก่อกวนตำแหน่ง III ของรอยเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ พบว่าขนาดของเม็ดเกรนของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อมต่ำ คือ 50 mm/min มีค่ามากที่สุดและขนาดเม็ดเกรนมีแนวโน้มที่เล็กลงเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่าที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 9 การลดลงของขนาดเกรนเมื่อความเร็วในการเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นนี้ คาดว่าเกิดจากการลดลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่มีค่าสูงส่งผลต่อการลดอุณหภูมิของแนวเชื่อม [12] และทำให้ความสามารถในการเติบโตของเม็ดเกรนที่เกิดขึ้นใหม่ เพื่อให้มีขนาดเกรนที่ใหญ่เพิ่มขึ้นนี้มีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับแนวเชื่อมที่มีค่า



รูปที่ 8 โครงสร้างแนวเชื่อมที่ความเร็วเดินแนว 125 mm/min:

(ก) โครงสร้างมหภาค (ข) โครงสร้างอูมิเนียมหลัก
(ค) บริเวณพื้นที่การกวน (ง) บริเวณพื้นที่การกวนและพื้นที่รับอิทธิพลความร้อน

อุณหภูมิในแนวเชื่อมที่มีค่าสูง [13] นอกจากนั้น ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการกวนที่รุนแรงกว่าความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ต่ำ และทำให้การเกิดการก่อตัวของผลึกหรือเกรนใหม่มีขนาดที่เล็กกว่า [7]



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฉลี่ยและความเร็วเดินแนวเชื่อม

4. สรุปผลการทดลอง

- 1) การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนที่ใช้ตัวทงทรงกระบอกสามารถทำการเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียม 6063-T1 ได้ และแสดงค่าความแข็งแรงประมาณร้อยละ 50 ของอลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุทดลอง
- 2) ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลง แต่หากความเร็วเดินแนวเชื่อมที่เร็วเกินไปจะทำให้จุดบกพร่องมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น และส่งผลโดยตรงทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง
- 3) โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อแสดงการเกิดเกรนใหม่ที่มีรูปร่างที่กลมมนและมีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างในเนื้ออลูมิเนียมหลัก

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์บุญส่ง จงกลนี้ ประจำห้องปฏิบัติการเครื่องจักรกลอัตโนมัติ คุณชวลิต นุชวงษ์ และคุณขวัญชัย อยู่สะอาด เจ้าหน้าที่กลุ่มการพัฒนากระบวนการผลิตวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำหรับความช่วยเหลือในจัดเตรียมการทดลองและขั้นตอนทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, and C.J. Dawes, "Friction Stir Welding", G.B. Patent 1991, Application No. 9125978.8.

- [2] W.M. Thomas, and E.D. Nicholas, "Friction Stir Welding for the Transportation Industries", Materials and Design, 18, 1997, pp. 269-273.
- [3] H.J. Liu, J.C. Fenga, H. Fujii, and K. Nogi, "Wear Characteristic of WC-Co tool in Friction Stir Welding of AC4A+30%vol SiCp Composite", Inter. J. of Machine Tool&Manufacture, 45, 2005, pp. 1635-1639.
- [4] M. Peel, A. Steuwer, M. Preuss, and P.J. Withers, "Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stresses as a Function of Welding Speed in Aluminum AA5083 Friction Stir Welds", Acta Materialia, 51, 2003, pp. 4791-4801.
- [5] E. Ericsson, and A. Sandstrom, "Influence of Welding Speed on the Fatigue of Friction Stir Welds and Comparison with MIG and TIG", Journal of Fatigue, 25, 2003, pp. 1379-1387
- [6] K.V. Jata, and S.L. Semiatin, "Continuous Dynamic Recrystallization during Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys", Scripta Mater., 43, 2000., pp. 743-749.
- [7] Y. Li, L.E. Murr, and J.C. McClure, "Flow Visualization and Residual Microstructure associated with the Friction-stir Welding of 2024 Aluminum and 6061 Aluminum", Materials Science and Engineering A, 271, 1999, pp. 213-223.
- [8] Mishra, R.S. and Ma, Z.Y. 2005. Friction Stir Welding and Processing. Materials Science and Engineering R. 50: 1-78.
- [9] บรรเจิด ดอนเนตรงาม และสมนึก วัฒนศรียุกุล, "การเปรียบเทียบกระบวนการเชื่อมเสียดทานหมุนกวนอลูมิเนียมเจือ AA6063-T6 ระหว่างสลักแกนหมุนทรงกระบอกหัวตัดตรงกับหัวโค้ง", การประชุมรายงานวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี 2550. กรุงเทพฯ, 24-26 ตุลาคม 2550, แผ่นซีดีรอม
- [10] K. Kimapong and T. Wanatabe, "Effect of Welding Process Parameters on Mechanical Property of FSW Lap Joint between Aluminum Alloy and Steel", Materials Transaction, 46, 2005, pp. 2211-2217.
- [11] www.metallography.com/grain.htm, January 15, 2008.
- [12] M. Song and R. Kovacevic, "Thermal Modeling of Friction Stir Welding in a Moving Coordinate System and Its Validation", International Journal of Machine Tool and Manufacturing, 43, 2003, pp. 605-615.
- [13] I. Charit, R.S. Mishra, and M.W. Mahoney, "Multi-sheet Structures in 7475 Aluminum by Friction Stir Welding in Concert with Post-weld Superplastic Forming", Scripta Materialia, 47, 2002, pp. 631-636.