

อิทธิพลรูปร่างตัวกวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ต่อความต้านทานแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม AA6063-T1

Effect of FSW Stirrer Geometries on Tensile Strength of AA6063-T1 Aluminum Alloy

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

กลุ่มการพัฒนาระบบการผลิตวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12100

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

บทคัดย่อ—บทความนี้เสนอผลการศึกษาด้านอิทธิพลรูปร่างตัวกวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน เช่น ทรงกระบอก ทรงกรวย ทรงเกลียวขวา และเกลียวขวา ต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างตัวกวนส่งผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมต่อชนอลูมิเนียมผสมเกรด 6063-T1 ตัวกวนทรงกระบอกและตัวกวนทรงกรวยทำให้เกิดจุดบกพร่องในแนวเชื่อมบริเวณด้านล่าง และเป็นจุดกำเนิดการพังทลายบริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อมขณะทำการทดสอบแรงดึง ตัวกวนทรงเกลียวขวาและวงขวาทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ ไม่มีจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม ส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงกว่าโลหะหลักอลูมิเนียม

Abstract—This paper proposes a study of Friction Stir Welding stirrer geometries effect such as cylindrical, cone, left screw and right screw stirrer shape on tensile strength of AA6063-T1 aluminum alloy butt joint. A variation of FSW Stirrer shape affected directly the AA6063-T1 aluminum alloy butt joint quality. A cylindrical stirrer shape and a cone stirrer shape produced the void defect at the bottom part of the weld metal and initiated the failure of the joint when the joint was subjected the load during the tensile test. Left and right screw stirrer shapes gave the sound joint with no void effect on the weld metal and affected to increase the joint strength that was higher than that of the aluminum base metal.

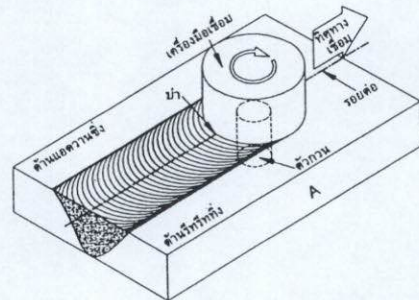
Keywords—Friction stir welding, Butt joint, Aluminum alloy, Tensile strength

1. บทนำ

การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid state welding) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย (Conventional fusion welding) เช่น อลูมิเนียมผสม [1] เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย FSW สามารถทำให้กลสมบัติของแนวเชื่อมมีค่าสูงในบริเวณแนวเชื่อม (Welded Zone) กระบวนการ FSW นี้ได้มีการประยุกต์ใช้อย่างมีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบิน รถยนต์ และเรือเดินสมุทร [1] และปัจจุบันเป็นกระบวนการเชื่อมที่ได้รับความนิยมสูงในการทำวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติต่างๆ อย่างต่อเนื่อง ลักษณะกระบวนการเชื่อมแสดงไว้ในรูปที่ 1

ที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้ FSW ในการเชื่อมอลูมิเนียมเกรดต่างๆ มากมาย เช่น การเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียมผสม A356 [3] อลูมิเนียมเกรด AA2017 [4] อลูมิเนียมเกรด AA5083 [5] อลูมิเนียมเกรด AA6082 [6] อลูมิเนียมผสม Al-Li-Cu [7]

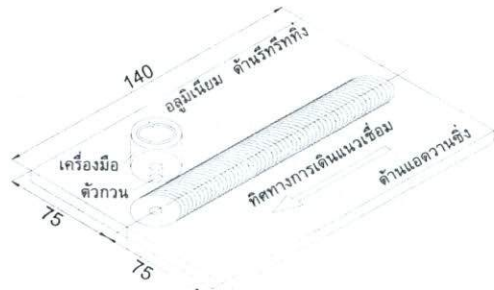
เป็นต้น และการศึกษาเหล่านี้ได้รายงานความแข็งแรงของรอยต่อชนเหล่านี้มีค่าสูงกว่าอลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุในงานเชื่อม อย่างไรก็ตามในกรณีอลูมิเนียมผสม 6063-T1 ซึ่งเป็นอลูมิเนียมที่สามารถผลิตและใช้งานในประเทศไทยนั้น ไม่ได้มีรายงานไว้ด้วยเหตุนี้จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ในการประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรดนี้



รูปที่ 1 การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน

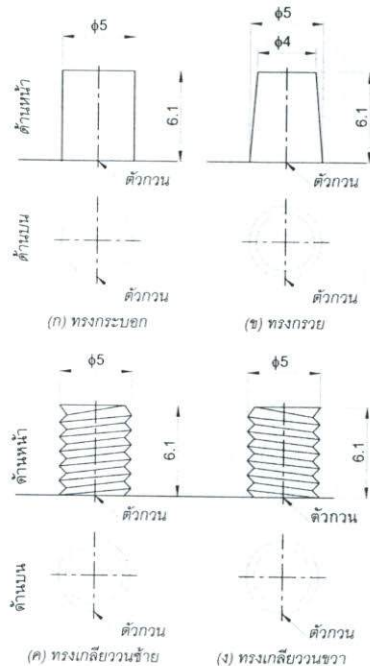
นอกจากนี้จากหลักการเบื้องต้น ตัวกวนที่สอดเข้าไปในรอยต่อ เป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่บ่งชี้การรวมตัวของวัสดุ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของตัวกวนที่ใช้ในการเชื่อมรอยต่อ คาดว่าจะทำให้ได้คุณลักษณะและความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน ที่ผ่านมามีการออกแบบรูปร่างตัวกวนหลายแบบเพื่อทำการเชื่อมรอยต่อชนอลูมิเนียมผสม เช่น การออกแบบตัวกวนให้มีรูปร่างแบบเกลียวขวา (Right Screw) ที่ทำให้อลูมิเนียม 2024 สามารถรวมตัวเข้ากับอลูมิเนียม 6061 ได้ดีและเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อ [8] การใช้ตัวกวนเกลียวขวาในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเซรามิก แต่อัตราการสึกกร่อนของตัวกวนที่เกิดมีค่าสูง [9] หรือการใช้ตัวกวนที่มีรูปร่างหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส เกลียวขวา และเกลียวซ้าย ในการเชื่อมอลูมิเนียม 1018 ที่แสดงการรวมตัวของวัสดุเป็นไปได้ดีในการใช้ตัวกวนเกลียวขวาและการทดสอบความแข็งแรงด้วยการดึงโค้ง ขึ้นทาด สอนไม่แสดงการแตกหักบริเวณรอยเชื่อม [10] การออกแบบตัวกวนเกลียวขวา ที่เป็นทรงกระบอกและทรงกรวยในการเชื่อมอลูมิเนียม 2014 และค่าความแข็งแรงสูงสุดประมาณร้อยละ 75 ของความแข็งแรงของอลูมิเนียมสามารถทำได้โดยตัวกวนเกลียวขวาทรงกรวย เนื่องจากขนาดของเกรนเล็กและละเอียดขึ้น [11] ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ในการเชื่อมอลูมิเนียมผสมเกรด AA6063-T1 ด้วย FSW และทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของแนวเชื่อมเพื่อเตรียมข้อมูลในการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่อไป

2. วิธีการทดลอง

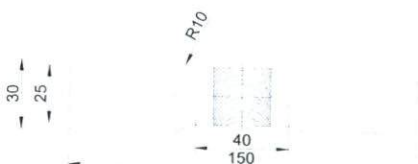


รูปที่ 2 มิติของรอยต่อชน (หน่วย: มม.)

วัสดุในการทดลอง คือ อลูมิเนียมผสมเกรด 6063-T1 (94.7%Al-4.0%Mg-0.05%Mn-0.01%Cr-0.02%Cu โดยน้ำหนัก) หนา 6.3 มม. ที่มีความแข็งแรงดึงสูงสุดประมาณ 210 MPa เมื่อทำการทดสอบดึงตามแนวรีด แผ่นอลูมิเนียมถูกเตรียมให้มีขนาดยาว 140 มม. และกว้าง 75 มม. แผ่นอลูมิเนียมถูกนำมาประกอบเป็นรอยต่อชนดังแสดงในรูปที่ 2 และยึดแน่นบนอุปกรณ์จับยึด (Jig) ก่อนยึดแน่นอีกครั้งบนแท่นเครื่องกัด เครื่องมือเชื่อมทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD11 มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ทรงเกลียวซ้าย เกลียวขวา และทรงกรวย โดยมีขนาดและรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 3 ความเร็วรอบของตัวแกนมีค่า 2000 rpm ความเร็วของการเดินแนวเชื่อมไปตามแนวต่อชนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 50 ถึง 200 mm/min ความเอียงของตัวแกน 2° เมื่อทำการเชื่อมเสร็จสมบูรณ์ ชิ้นงานเชื่อมถูกนำมาทำการเตรียมชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 4 แนวเชื่อมบริเวณกึ่งกลางตามทิศทางการเดินทางแนวเชื่อมถูกตัดและตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคในทิศทางตั้งฉากกับทิศทาง การเชื่อม เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมและเปรียบเทียบกับความต้านทานแรงดึงต่อไป



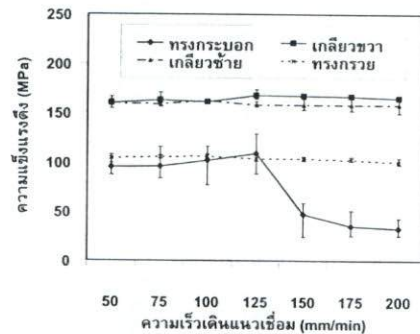
รูปที่ 3 มิติของตัวแกนเครื่องมือเชื่อม (หน่วย: มม.)



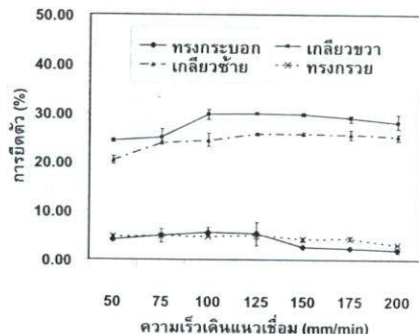
รูปที่ 4 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึง (หน่วย: มม.)

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

รูปที่ 5 และ 6 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดึงและ % การยึดตัวของชิ้นงานเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวแกนรูปร่างต่างๆ และค่าความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 - 200 mm/min พบว่าชิ้นทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยตัวแกนรูปทรงกระบอก แสดงค่าความแข็งแรงและค่าร้อยละการยึดตัวของชิ้นทดสอบมีค่าสูงสุดที่ค่าประมาณ 110MPa และ 5.36% เมื่อเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 mm/min ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมมีค่าแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 50 ถึง 125 mm/min และลดลงอีกครั้ง เมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 150 ถึง 200 mm/min การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยตัวแกนรูปทรงกระบอกนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดจุดบกพร่องที่บริเวณมุมด้านล่างของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 8 (ก) ทำการวัดเปรียบเทียบความโคตามแนวแกน X และ Y ของจุดบกพร่องนี้ พบว่ามีค่าเฉลี่ยสำหรับ 50 mm/min ประมาณ 1.554 mm และ 2.818 mm ค่าเฉลี่ยสำหรับ 125 mm/min ประมาณ 1.530 mm และ 2.754 mm และค่าเฉลี่ยสำหรับ 200 mm/min ประมาณ 4.372 mm และ 3.369 mm ซึ่งแสดงขนาดมิติที่ใหญ่ขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมนั้นมีค่าน้อยกว่าหรือสูงกว่าค่าความเร็วรอบที่เหมาะสมซึ่งในตัวแปรแรกคือ ตัวแกนรูปทรงกระบอกนั้นมีค่าความเร็วเดินที่เหมาะสมที่ 125 mm/min แนวการพังทลายของชิ้นงานเมื่อทำการทดสอบแรงดึงนั้นเกิดขึ้นผ่านจุดดังกล่าวและขยายไปยังคว้านบนของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 7 และแนวเส้นประในรูปที่ 8 (ก) จึงสามารถสรุปได้ว่าจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อ นอกจากนี้พบว่าจุดบกพร่องนี้ที่ได้มีลักษณะคล้ายกับจุดบกพร่องที่เกิดในการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนรอยต่ออลูมิเนียมเกรด 2025 [8] และอลูมิเนียมเกรด 6063-T6 [12] แต่ในรายงานผลการทดลองการเชื่อมอลูมิเนียมทั้งสองเกรดนี้ไม่ได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดจุดบกพร่องและความแข็งแรงดึงไว้ อย่างไรก็ตาม Mishra and Ma [13] ได้กล่าวไว้ว่า หากมีการเอียงตัวแกนเพิ่มมากขึ้นหรือรูปร่างของตัวแกนถูกออกแบบให้มีลักษณะที่คาดว่าจะทำให้เกิดการกวนที่รุนแรงขึ้นและจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นนั้นจะสามารถกำจัดออกได้ [13] ซึ่งจากค่ากล่าวนี้ผู้วิจัยจึงใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบตัวแกนในการทดลองต่อไป

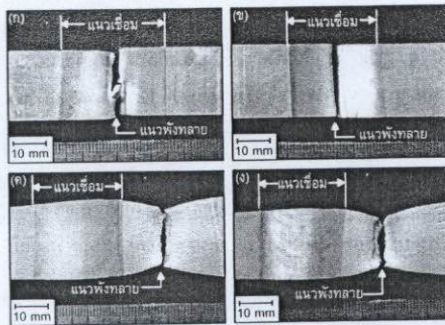


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงและความเร็วเดินแนวของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวแกนรูปร่างต่างๆ

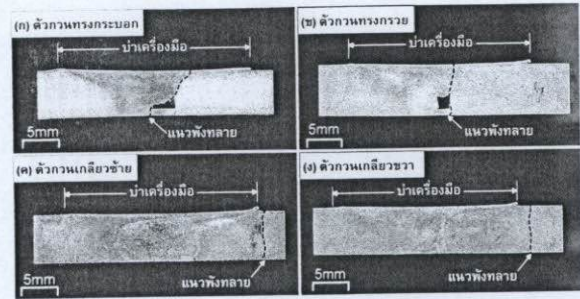


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยึดตัวและความเร็วเดินแนวของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวแกนรูปร่างต่างๆ

ตัวกวนทรงกรวย เป็นตัวกวนของการเชื่อมด้วยการ
เสียดทานแบบกวนที่ออกแบบ เพื่อลดแรงเสียดทานที่มักเกิดขึ้นสูง
ในขั้นตอนของการกดตัวกวนลงระหว่างรอยต่อของแนวเชื่อม [13]
อย่างไรก็ตามในการใช้ตัวกวนทรงกรวยในการเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียม 6063-T1
ไม่สามารถกำจัดจุดบกพร่องที่เกิดในตำแหน่งด้านล่างของรอยเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 8
(ข) ลงได้ จุดบกพร่องในตำแหน่งและลักษณะนี้เป็นลักษณะเดียวกับ
ที่เกิดขึ้นในรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอก และเป็นสาเหตุให้รอยต่อมี
ความแข็งแรง น้อยลง และเป็นจุดกำเนิดการพังทลายที่ขยายตัวต่อ
ไปสู่ด้านบนของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 7 (ข) และแนวเส้นประในรูปที่ 8 (ข)
จุดบกพร่องนี้ส่งผลทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6
โดยค่าความแข็งแรงสูงสุดของรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกรวยมีค่าสูงสุดประมาณ
106 MPa ที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min และค่าการยืดตัว 4.66%

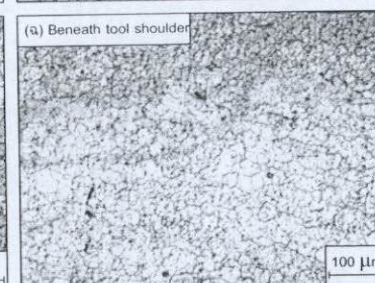
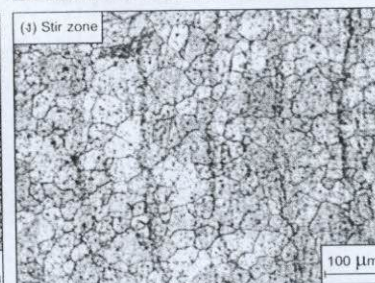
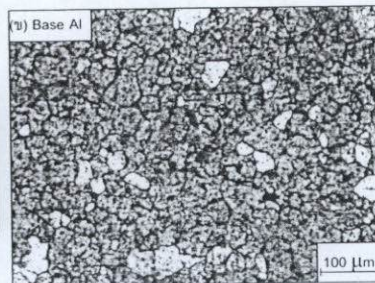
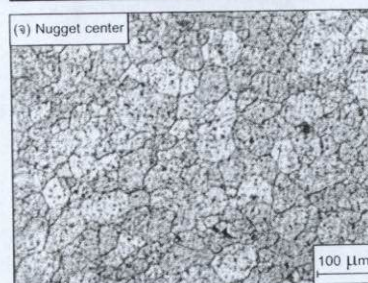
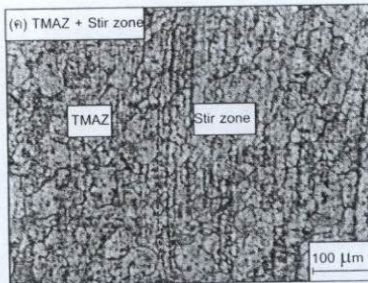


รูปที่ 7 ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม
125 mm/min.: (ก) ทรงกระบอก (ข) ทรงเกลียวซ้าย (ค) ทรงเกลียวขวา และ (ง) ทรง
กรวย



รูปที่ 8 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปร่างต่างๆ ที่ความเร็วรอบ
2000 rpm และ 125 mm/min.

รอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงเกลียววนซ้ายและขวา สามารถกำจัด
จุดบกพร่องที่พบในรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนทรงกระบอกและทรงเกลียวในตำแหน่ง
มุมด้านล่างของแนวเชื่อมลงได้ดังแสดงในรูปที่ 8 (ค) และ (ง) โครงสร้างมหภาคที่ได้
แสดงความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมที่ไม่มีจุดบกพร่องเกิดขึ้น ทำให้จุดกำเนิดการพังทลาย
ที่เกิดขึ้นในรอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงที่ผ่านมานั้นหมดไป เมื่อนำรอยต่อไปทำ
การทดสอบแรงดึงพบว่าชิ้นงานเกิดการพังทลายที่บริเวณโลหะหล่ออลูมิเนียม ไม่เกิดที่
บริเวณแนวเชื่อมอีกต่อไปดังแสดงในรูปที่ 7 (ค)-(ง) และเส้นประในรูปที่ 8 (ค)-(ง) ค่า
ความแข็งแรงดึงและการยืดตัวของรอยต่อมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากรอยต่อมีค่าความ
แข็งแรงกว่าโลหะอลูมิเนียมที่ใช้เชื่อม และค่าความแข็งแรงที่ได้เป็นค่าความแข็งแรง
ของโลหะอลูมิเนียมเท่านั้น อย่างไรก็ตามในการเชื่อมด้วยตัวกวนทรงเกลียววนซ้ายและ
ขวา ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ได้มีค่าประมาณ 168 MPa ที่รอยต่อที่เชื่อมด้วยตัวกวนวน
ซ้าย ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 mm/min



รูปที่ 9 โครงสร้างแนวเชื่อมตัวกวนเกลียวซ้าย: (ก) โครงสร้างมหภาค (ข) โครงสร้างอลูมิเนียมหลัก (ค) บริเวณพื้นที่อิทธิพลความร้อน-กลและพื้นที่การกวน (ง) พื้นที่การ
กวน (จ) พื้นที่ที่เกิด (ฉ) พื้นที่ใต้บ่าเครื่องมือ

รูปที่ 9 (ก) แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยกวนทรงเกลียววนซ้าย ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 mm/min ที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดในการทดลองครั้งนี้ ตัวอักษร AS หมายถึง ด้านแอดวานซ์ และตัวอักษร RS หมายถึง ด้านรีทริทิ่ง รอยเชื่อมแสดงความสมบูรณ์ ไม่พบจุดบกพร่องเกิดขึ้นภายในแนวเชื่อม บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อมเรียกว่า "พื้นที่การกวน (Stir zone)" พบอนุภาคนิวมันเป็นวง พื้นที่นี้เรียกว่า "พื้นที่นุกเกต (Nugget zone)" ซึ่งเป็นพื้นที่การกวนรุนแรง และอนุภาคนิวมันที่อ่อนตัวจากความร้อนเสียดทาน ถูกคัดเหิน และอัดอย่างรุนแรงเข้าด้วยกัน บริเวณพื้นที่นี้รูป แบบของเม็ดเกรนจะเกิดการก่อตัวขึ้นใหม่และมีขนาดเล็กกลมมนขึ้น ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่มีความแตกต่างบนโครงสร้างมหภาคที่ตำแหน่ง I ถึง V มีรายละเอียดดังนี้ รูปที่ 9 (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะหล่ออลูมิเนียม 6063-T1 ที่รูปร่างของเม็ดเกรนที่ไม่เป็นระเบียบและไม่กลมมน ทำการวัดขนาดเกรนด้วยวิธี การลากเส้นตัดผ่านเกรน (Linear Interception) ตามมาตรฐาน ASTM E112 [14] พบว่ามีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 33.99 ไมโครเมตร จุดที่ II คือขอบเขตระหว่างพื้นที่รับอิทธิพลจากความร้อนและแรงทางกล (Thermo-mechanical Affected Zone: TMAZ) [3,7,8] ซึ่งเป็นพื้นที่เกิดการปรับสภาพเนื่องจากความร้อนและแรงทางกล ทำให้เม็ดเกรนมีขนาดที่กลมมนดังแสดงในพื้นที่ด้านซ้ายของเส้นประรูปที่ 9 (ค) และหากเปรียบเทียบกับรูปร่างของเม็ดเกรนโลหะหล่ออลูมิเนียม 6063-T1 พบว่ากลมมนและเป็นระเบียบกว่า ขณะที่ด้านขวาของเส้นประรูปที่ 9 (ค) รูปที่ 9 (ง) และรูปที่ 9 (จ) นั้น คือ พื้นที่การกวน ที่อนุภาคนิวมันเกิดการก่อตัวของเกรนใหม่ (Dynamic Recrystallization) [7] ที่มีความละเอียดและกลมมน ทำการวัดขนาดเกรนพบว่ามีขนาดเกรนเฉลี่ย 18.49 μm ซึ่งมีขนาดที่เล็กกว่าอูมิเนียมหลัก เปรียบเทียบกับขนาดเกรนของพื้นที่การกวนของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกวนทรงกระบอกที่มีขนาดเกรนประมาณ 25.42 μm พบว่ามีค่าที่น้อยกว่า อย่างไรก็ตามบริเวณขนาดเกรนที่ได้ไม่ใช่นิวมันขนาดเล็กที่สุด ตำแหน่งที่มีขนาดเกรนเล็กที่สุด คือ ตำแหน่งด้านล่างของบ่าเครื่องมือเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 9 (ฉ) เนื่องจากเป็นบริเวณที่ได้รับความร้อนสูงและเกิดการเลื่อนสูงสุดในแนวเชื่อม [7] แต่มีบริเวณการเกิดลิกลมมาจากผิวหน้าแนวเชื่อมเพียง 150 μm เท่านั้น

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลรูปร่างตัวกวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่อเชื่อมอูมิเนียม 6063-T1 โดยทำการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตัวกวน และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้

1. ตัวกวนทรงกระบอกและตัวกวนทรงกรวยทำให้เกิดจุดบกพร่องในแนวเชื่อมบริเวณด้านล่าง และเป็นจุดกำเนิดการพังทลายบริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อม
2. ตัวกวนทรงเกลียววนซ้ายและขวาทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ ไม่มีจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม ส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงกว่าโลหะหล่ออูมิเนียม
3. ความแข็งแรงสูงสุดในการทดลองมีค่าเท่ากับ 168 MPa ที่ตัวกวนทรงเกลียววนซ้าย ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินแนว 125 mm/min
4. โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนวนซ้าย ทำให้เกิดการก่อตัวของเกรนใหม่ที่มีขนาดที่เล็กและกลมมนกว่าโลหะหล่ออูมิเนียม

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 Application No. 9125978.8.
- [2] Thomas, W.M. and Nicholas, E.D. 1997. Friction Stir Welding for the Transportation Industries. Materials and Design, 18: 269-273.

- [3] Lee, W.B., Yeon, Y.M. and Jung, S.B. 2003. The Improvement of Mechanical Properties of Friction-stir-welded A356 Al Alloy. Mater. Sci. and Eng. A, 355: 154-159.
- [4] Lie, H.J., Fujii, H., Maeda, M. and Nogi, K. 2003. Tensile Properties and Fracture Locations of Friction Stir Welding Joints of 2017-T351 Aluminum Alloy. J. of Mat. Proc. Tech., 142: 692-696.
- [5] Peel, M., Steuwer, A., Preuss, M. and Withers, O.J. 2003. Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stresses as a Function of Welding Speed in Aluminum AA5083 Friction Stir Welds. Acta Mater., 51: 4791-4801.
- [6] Ericsson, E. and Sandstrom, A. 2003. Influence of Welding Speed on the Fatigue of Friction Stir Welds and Comparison with MIG and TIG. J. of Fatigue, 25: 1379-1387.
- [7] Jata, K.V. and Semiatin, S.L. 2003. Continuous Dynamic Recrystallization during FSW of High Strength Aluminum. Scripta Mater., 43: 743-749.
- [8] Li, Y., Murr, L.E. and McClure, J.C. 1999. Flow Visualization and Residual Microstructure associated with the Friction-stir Welding of 2024 and 6061 Aluminum. Mat. Sci. and Eng. A, 271: 213-223.
- [9] 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% Al₂O₃: A Preliminary Study. Scripta Met., 45: 75-80.
- [10] Boz, M. and Kurt, A. 2004. The Influence of Stirrer Geometry on Bonding and Mechanical Properties in Friction Stir Welding Process. Mat. and Des., 25: 343-347.
- [11] 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. Mat. Letters, 59: 2948-2952.
- [12] บรรเจิด คอบเนตรงาม และสมนึก วัฒนศรียศกุล. 2550. การเปรียบเทียบกระบวนการเชื่อมเสียดทานหมุนกวนอูมิเนียมเจือ AA6063-T6 ระหว่างสติกแกนหมุนทรงกระบอกหัวตัดตรงกับหัวโค้ง. การประชุมรายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2550. ภูเก็ต, ประเทศไทย, 24-26 ตุลาคม 2550: แผ่นซีดีรวม
- [13] Mishra, R.S. and Ma, Z.Y. 2005. Friction Stir Welding and Processing. Mat. Sci. and Eng. R. 50: 1-78.
- [14] www.metallography.com/grain.htm, January 15, 2008.