



อิทธิพลของระยะลึกและรูปทรงป้าของเครื่องมือเชื่อมต่อความแข็งแรงของรอยต่อการเชื่อม เสียดทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 Effect of Depth Penetration and Tool Shoulder on Friction Spot Joining Joint Strength between AA1100 Aluminum Alloy and AISI304 Stainless Steel

อดิศร เปลียนดิษฐ์^{1*} กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110

E-mail: Pliandit_9@yahoo.com*

บทคัดย่อ

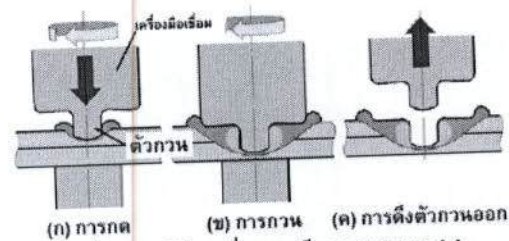
บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของระยะลึกและรูปทรงป้าของเครื่องมือเชื่อมเสียดทานแบบจุดที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยมีผลการทดลองโดยสรุปดังนี้ รอยต่อเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 สามารถเชื่อมติดกันและมีความแข็งแรงสูงสุดประมาณ 179 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ความแข็งแรงของรอยต่อเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะความลึกในการเชื่อมจากผิวอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น การเชื่อมที่ระยะขอบเขตระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมจะให้ความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุด เครื่องมือเชื่อม T4 ที่มีรูปทรงป้าเว้า รัดมี 2 มม. จะให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุด

คำหลัก การเชื่อมเสียดทานแบบจุด, อลูมิเนียม, เหล็ก, รอยต่อเชื่อม, ความแข็งแรง

1. บทนำ

การเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction spot joining: FSJ) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid state welding) ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยกลุ่มบริษัทมาสด้า (Mazda Motor Cooperation) [1] และบริษัทอุตสาหกรรมหนักคาวาซากิ (Kawasaki Heavy Industry) [2] เพื่อใช้ในการเชื่อมวัสดุแผ่นบางในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ของประเทศญี่ปุ่น โดยมีจุดประสงค์หลักในการลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงงานประกอบรถยนต์ในประเทศญี่ปุ่น โดยนำเอาวิธีการเชื่อมนี้เข้าไปทดแทนการเชื่อมต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding: RSW) หลักการอย่างง่ายในการทำให้เกิดรอยต่อของโลหะแผ่นบางแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งงานที่เป็นลักษณะของรอยต่อเชื่อมถูกวางยึดแน่นอยู่บนพื้นระนาบดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) จากนั้นเครื่องมือเชื่อมที่เป็นรูปทรงกระบอกที่มีตัวกวนรูปทรงกระบอกขนาดเล็กติดอยู่ที่ส่วนปลาย ถูกทำให้หมุนด้วยความเร็วสูงที่กำหนดแล้วกดตัวกวนลงไปในรอยต่อด้วยความเร็ว แรงกด และระยะความลึกที่กำหนดจนกระทั่งป้าของเครื่องมือจมลงไปในผิวโลหะด้านบนของรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) จากนั้นตัวกวนจะถูกกดแช่ที่ตำแหน่งนั้นตามระยะเวลา

ที่กำหนดแล้วถอนตัวขึ้นจากรอยต่อ จะได้รอยต่อที่เกิดการประสานกันของโลหะ 2 แผ่นดังแสดงในรูปที่ 1 (ค) จากหลักการเบื้องต้นในการทำให้เกิดรอยต่อในสถานะของแข็งที่โลหะบริเวณรอยต่อไม่ก่อให้เกิดการหลอมละลายของโลหะจึงมีเหตุผลเป็นไปได้ว่า การเชื่อมเสียดทานแบบจุดนี้สามารถใช้ในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดที่ยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลายอื่นๆ เช่น การเชื่อมอาร์ค การเชื่อมแก๊ส หรือการเชื่อมมิก/แมก ได้ เพราะการเชื่อมที่กระทำภายใต้จุดหลอมเหลวของวัสดุไม่ก่อให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะหรือข้อบกพร่องอื่นๆ ที่ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อลดลงได้ ดังเช่นการประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในการเชื่อมอลูมิเนียมและเหล็กที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงที่ยอมรับได้ [3]



รูปที่ 1 กรรมวิธีการเชื่อมแรงเสียดทานแบบจุด [1]

รอยต่อวัสดุต่างชนิดที่ได้รับความสนใจในการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ในปัจจุบันมีหลายชนิด หนึ่งในนั้นคือรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก ซึ่งในการนำมาใช้งานนั้น ผู้คิดค้นมีจุดประสงค์เพื่อทำให้น้ำหนักรวมของโครงสร้างรถยนต์ลดลง ทำให้รถยนต์ใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพ ประหยัดการใช้ น้ำมัน และส่งผลทางอ้อมต่อการรักษาสีสิ่งแวดล้อม ที่ผ่านมามีการรายงานผลการทดลองการประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานแบบจุดในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กที่น่าสนใจ คือ Fujimoto *et al.* [1] ได้รายงานการเชื่อมเสียดทานแบบจุดรอยต่อเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมผสม 6061 กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ผลการทดลองพบว่าความแข็งแรงสูงสุดของรอยต่อ มีค่าใกล้เคียงกับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด นอกจากนั้น Tanaka and Kumagai [2] ได้เชื่อมเสียดทานแบบจุดรอยต่อเชื่อม

อลูมิเนียม 6061 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะของปลายของตัวกวนที่สอดเข้าไปในรอยต่อแยก ระหว่างเหล็กกล้าและอลูมิเนียม และความเร็วยรอบของตัวกวน พบว่ารอยต่อมีความแข็งแรงสูงสุด มีสารประกอบกึ่งโลหะก่อตัวขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงเนื่องจากรอยฉีกขาด (Fracture Path) ของรอยต่อไม่ได้เกิดขึ้นผ่านแนวนี้ Lin et al. [4-5] แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคและรูปแบบการฉีกขาดของแนวเชื่อม ที่เกิดจากเชื่อมโดยเครื่องมือเชื่อมที่มีรูปทรงปากแบนและรูปทรงปากเฉียง กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [6] ได้ประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานแบบจตุรรอยต่ออลูมิเนียมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยทำการศึกษาดัชนีประกอบไปด้วย ความเร็วยรอบ ความเร็วสอด เวลากดแซ่ และรายงานความแข็งแรงของรอยต่อที่มีค่าสูงกว่าอลูมิเนียมหลักที่ใช้ในการทดลอง

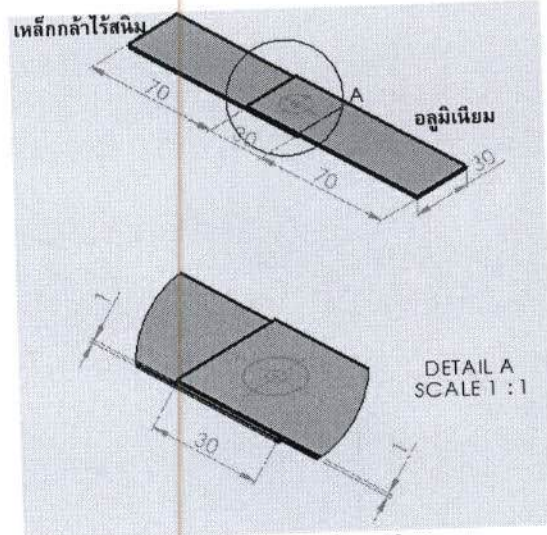
อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรการเชื่อมอื่นๆ ของ การเชื่อมเสียดทานแบบจตุรรอยต่ออลูมิเนียมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ไม่ได้มีการรายงานไว้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้ FSJ ในการเชื่อมอลูมิเนียมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยทำการศึกษาดัชนีการเชื่อมเพิ่มเติมที่ประกอบด้วย ระยะความลึกและรูปร่างของปากเครื่องมือเชื่อม ที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อแยก เพื่อให้ได้รอยต่อที่มีความแข็งแรงสูงสุดที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ต่อไป

2. การทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ อลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 แผ่นรีดความหนา 1 มม. ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 ชิ้นทดสอบมีขนาดยาว 100 มม. และกว้าง 30 มม. โดยทิศทางของการรีดขนานด้านยาวของชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2

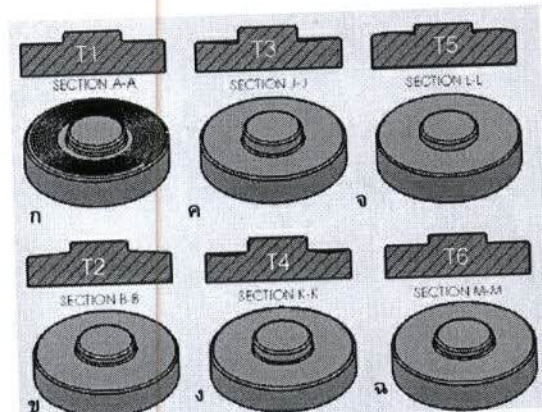
ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีและความต้านทานแรงดึงของวัสดุทดลอง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ธาตุ	อลูมิเนียม	เหล็ก
Fe	-	สมดุล
Al	สมดุล	-
C	-	0.05
S	-	0.004
Cr	-	18.17
Si	<0.95	0.384
N	-	0.037
Mn	<0.05	1.042
Ni	-	8.070
P	-	0.028
Cu	0.05-0.20	-
Zn	<0.10	-
ความต้านทานแรงดึง	164	520



รูปที่ 2 การจัดวางชิ้นทดสอบรอยต่อแยกในการทดลอง

แผ่นอลูมิเนียมวางต่อแยกอยู่บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 30 มม. แผ่นวัสดุทั้งสองถูกยึดในอุปกรณ์จับยึด (Jig) ที่ยึดแน่นบนแท่นเคลื่อนที่ของเครื่องกัดแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 3 รูปฉายด้านข้างและด้านบนของเครื่องมือเชื่อมที่มีรูปทรงปากต่าง ๆ : (ก) เครื่องมือเชื่อม T1 (ข) เครื่องมือเชื่อม T2 (ค) เครื่องมือเชื่อม T3 (ง) เครื่องมือเชื่อม T4 (จ) เครื่องมือเชื่อม T5 (ฉ) เครื่องมือเชื่อม T6

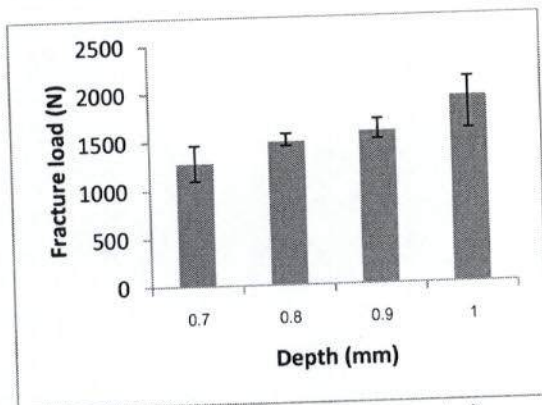
เครื่องมือเชื่อมทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 มีตัวกวนทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. สูง 0.7 มม. มีรูปทรงของปากเครื่องมือเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3 เครื่องมือเชื่อม T1 รูปทรงของปากเครื่องมือเชื่อมเป็นเกลียวกันหอย มีระยะพิท 0.29 มม. เครื่องมือเชื่อม T2 และ T3 รูปทรงของปากเครื่องมือเชื่อม มีลักษณะเฉียงออกและเฉียงเข้า ด้วยมุม 4 องศา เครื่องมือเชื่อม T4 และ T5 รูปทรงของปากเครื่องมือเชื่อมโค้งเว้าเข้าและนูนออก ด้วยรัศมี 2 มม. และเครื่องมือเชื่อม T6 รูปทรงของปากเครื่องมือเชื่อมแบนเรียบ หมุนด้วยความเร็วยรอบ 3000 รอบต่อนาที ความเร็วใน



การสอดตัวกวนจากผิวด้านบนของอลูมิเนียมมีค่า 8 มม. ต่อหน้าที่ ที่ระยะความลึกจากผิวด้านบนของแผ่นอลูมิเนียม 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 มม. ตามลำดับ ตัวกวนถูกสอดเข้าไปในแนวเชื่อมผ่านแผ่นอลูมิเนียม จนกระทั่งปลายตัวกวน ถึงระยะความลึกที่กำหนด ตัวกวนจะถูกกดเข้า ที่ระยะความลึกต่างๆ เป็นเวลาเวลา 3 วินาที ก่อนจะถูกดึงออกจากแนวเชื่อม รอยต่อที่ได้จากเชื่อมนำไปทดสอบความแข็งแรงของรอยต่อโดยการดึงเฉือนสภาวะละ 5 ชิ้น ทดสอบแล้วหาค่าเฉลี่ยความแข็งแรงที่ได้ และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นที่ที่เกิดการเชื่อม

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยต่อ และระยะความลึกในการเชื่อมของตัวกวนจากผิวด้านบนของอลูมิเนียม โดยใช้เครื่องมือเชื่อม T6 ที่มีรูปทรงของปากแบนเรียบ ในการทดลองใช้ความเร็วรอบในการเชื่อม 3000 รอบต่อนาที ความเร็วในการกดตัวกวน 8 มม. ต่อหน้าที่ เวลาที่ใช้ในกดตัวกวน 3 วินาที ที่ระยะความลึก 0.7 0.8 0.9 และ 1.0 มม. ผลการทดลองพบว่า ความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะความลึกของตัวกวนจากผิวอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งแรงของรอยต่อเชื่อมสูงสุดที่ระยะความลึก 1.0 มม. จากผิวอลูมิเนียม มีค่าเท่ากับ 1935 นิวตัน หรือ มีค่าประมาณ 154 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร อย่างไรก็ตามเมื่อระยะความลึกลดลงความแข็งแรงของรอยต่อลดลง มีสาเหตุมาจากความร้อนเสียดทานที่บริเวณขอบเขตระหว่างแผ่นอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม (Interface) ไม่เพียงพอ ทำให้การเชื่อมยึดระหว่างวัสดุทำได้ไม่ดี จึงสามารถสรุปได้ว่าระยะความลึก 1.0 มม. เป็นสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมที่สุดสามารถทำให้เกิดรอยต่อที่มีความแข็งแรงสูงได้

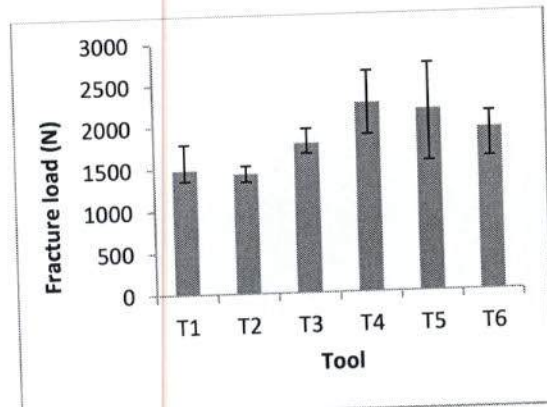


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยต่อกับระยะความลึกในการเชื่อมจากผิวอลูมิเนียม

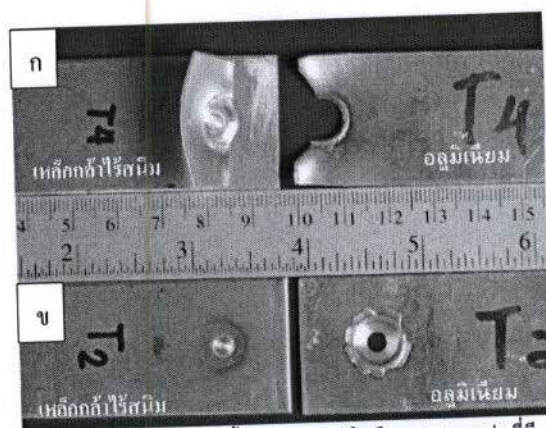
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยต่อ กับเครื่องมือเชื่อมที่มีรูปทรงปากลักษณะต่างๆ ของการเชื่อมที่ระยะขอบเขตระหว่างแผ่นอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม ผลการ

ทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือนพบว่า การเชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T4 ที่มีรูปทรงปากโค้งเว้า ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด เท่ากับ 2252 นิวตัน หรือประมาณ 179 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าความแข็งแรงดึงเฉือนของอลูมิเนียมผสม AA1100 ดังแสดงค่าไว้ในตารางที่ 1 ขณะที่การเชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T2 ความแข็งแรงต่ำสุดที่ 1433 นิวตัน หรือ ประมาณ 114 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าความแข็งแรงของอลูมิเนียม

เมื่อพิจารณาลักษณะการฉีกขาดของรอยเชื่อม ที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T4 ที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด พบว่ามีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุ เนื่องจากรับแรงดึงได้มากกว่า โดยลักษณะการฉีกขาดของรอยต่อไม่ได้เกิดผ่านบริเวณการเชื่อม แต่เกิดในอลูมิเนียมที่เป็นวัสดุหลัก ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) และรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T2 ที่ให้ค่าความแข็งแรงต่ำสุด พบว่ามีความแข็งแรงต่ำกว่าวัสดุหลัก เนื่องจากรอยเชื่อมไม่สามารถรับแรงดึงได้ โดยเกิดการฉีกขาดบริเวณรอบๆ จุดเชื่อมที่ถูกดึงออกมา (Pulled out fracture) ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) รอยฉีกขาดที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับรอยต่อจากการเชื่อม FSSW [4-5] ของอลูมิเนียม



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยต่อและรูปทรงปากเครื่องมือเชื่อม

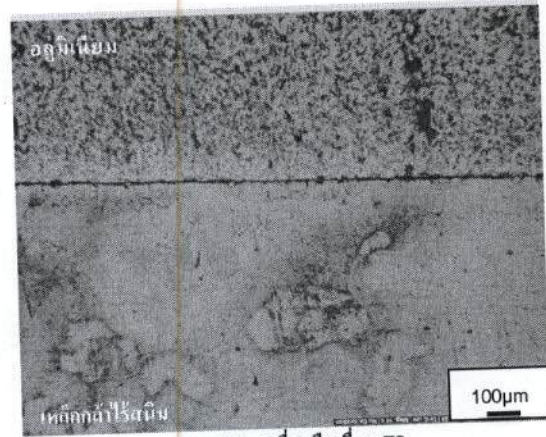


รูปที่ 6 การฉีกขาดของชิ้นทดสอบแรงดึงเฉือน: (ก) รอยต่อที่มีความแข็งแรงสูงสุด และ (ข) รอยต่อที่มีความแข็งแรงต่ำสุด

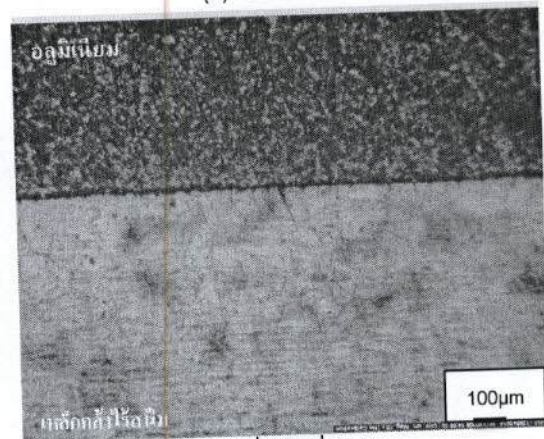
6111-T4 ซึ่งรอยต่อที่มีความแข็งแรงต่ำจะเกิดการฉีกขาดรอบๆ แนวเชื่อม ขณะที่รอยต่อที่มีความแข็งแรงสูงจะเกิดการฉีกขาดผ่านวัสดุอลูมิเนียม

ลักษณะรอยเชื่อมที่ให้ความแข็งแรงต่ำสุด และรอยเชื่อมที่ให้ความแข็งแรงสูงสุด ดังแสดงดังรูปที่ 7 รอยเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T2 มีค่าความแข็งแรงต่ำ อลูมิเนียมสันออกมาบริเวณขอบรอยเชื่อมมากจนมีลักษณะเป็นครีบริบรอบๆ รอยเชื่อม เนื่องจากปามีรูปทรงเอียงออก ทำการไหลของอลูมิเนียมจะไหลขึ้นสู่ด้านบนของผิววัสดุ ทำให้การผสมของวัสดุเกิดได้น้อย เมื่อวัดความหนาของอลูมิเนียมด้านล่างของปามีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.56 มม. แสดงดังรูปที่ 8 และ รอยเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T4 ซึ่งมีค่าความแข็งแรงสูงสุด บริเวณขอบรอยเชื่อมมีลักษณะเรียบ เนื่องจากลักษณะปามีโค้งเว้าเข้า ทำให้อลูมิเนียมจะไหลขึ้นบริเวณตัวกวนและไหลลงบริเวณใต้ปามีของเครื่องมือเชื่อม เมื่อวัดความหนาของอลูมิเนียมด้านล่างปามีค่า 0.76 มม. ซึ่งมากกว่าความหนาของอลูมิเนียมที่เกิดจากการเชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T6 จากผลการทดลองที่ได้คล้ายกับ Shigeki [7] ที่รอยเชื่อมจากเชื่อมด้วยเครื่องมือที่มีรูปทรงปามีเอียงออกมีความแข็งแรงน้อยกว่ารูปทรงปามีแบนเรียบและ รอยเชื่อมที่ได้จาก

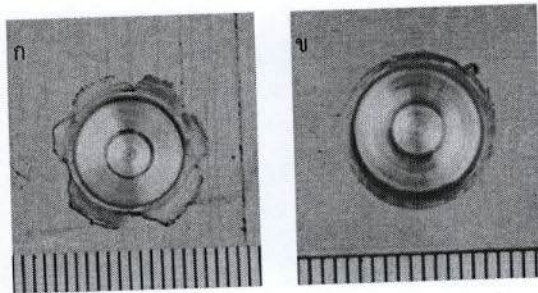
เครื่องมือเชื่อมที่มีรูปทรงปามีเว้าเข้ามีความแข็งแรงมากกว่ารูปทรงปามีแบนเรียบ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าความหนาของอลูมิเนียมที่ด้านล่างของปามีของเครื่องมือเชื่อม มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อ แต่สาเหตุที่แท้จริงควรมีการศึกษาต่อไป



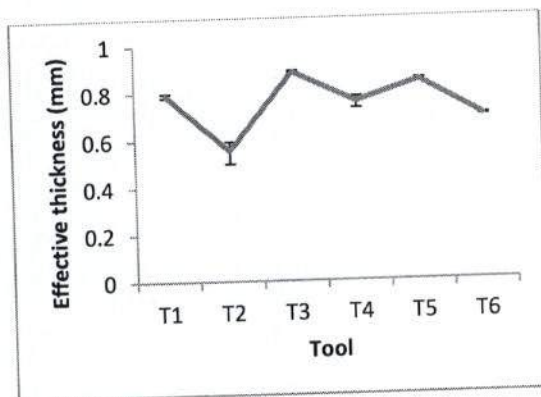
(ก) เครื่องมือเชื่อม T2



(ข) เครื่องมือเชื่อม T4



รูปที่ 7 ลักษณะรอยเชื่อมชิ้นงานของ (ก) รอยเชื่อมที่ให้ความแข็งแรงต่ำสุด (ข) รอยเชื่อมที่ให้ความแข็งแรงสูงสุด



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของอลูมิเนียมด้านล่างปามีเครื่องมือต่อชนิดของเครื่องมือเชื่อม

รูปที่ 9 โครงสร้างทางจุลภาคของรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วย (ก) เครื่องมือเชื่อม T2 และ (ข) เครื่องมือเชื่อม T4

รูปที่ 9(ก) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคชิ้นงานของการเชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อม T2 เกิดการเกาะยึดกันที่มีความแข็งแรงต่ำสุด จะเห็นการกระจายตัวของเกรนในเฟสอลูมิเนียม จะกระจายตัวห่างกว่า เกรนมีความหยาบ ขณะที่รอยเชื่อมจากเครื่องมือเชื่อม T4 ซึ่งเกิดการเกาะยึดกันที่มีความแข็งแรงสูงสุด ดังรูปที่ 9(ข) ที่การกระจายตัวของเกรนในเฟสอลูมิเนียมมีความหนาแน่น เม็ดเกรนละเอียดกว่า จึงทำให้มีความแข็งแรงมากกว่า อย่างไรก็ตามกลไกการเกิด และลักษณะของเฟสที่เกิดขึ้นบริเวณการเชื่อมนี้ จำเป็นต้องศึกษาอย่างละเอียดด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Transmission Electron Microscope: TEM) หรือการวัดการหักเหของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) เพื่ออธิบายลักษณะการเกาะยึดต่อไป



4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดกับรอยต่อเกลียวระหว่างอลูมิเนียมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 และศึกษาการเปลี่ยนแปลงระยะลึกการเชื่อมและลักษณะรูปทรงป่าของเครื่องมือเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติทางกลของรอยต่อ ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

- 1) รอยต่อเกลียวระหว่างอลูมิเนียมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 สามารถเชื่อมติดกันและมีความแข็งแรงสูงสุดประมาณ 179 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
- 2) ความแข็งแรงของรอยต่อเกลียวมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะความลึกของตัวกวนในการเชื่อมจากผิวอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น
- 3) การเชื่อมที่ระยะขอบเขตระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมจะให้ความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุด
- 4) เครื่องมือเชื่อม T4 ที่มีรูปทรงของป่าเว้า รัศมี 2 มม. เป็นเครื่องมือเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะครูอาจารย์ สถาบันพัฒนาฝีมือแรงงาน ภาค 8 นครสวรรค์ คุณสุริยา ประสบทอง และบุคลากร คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ วิทยาเขตสามชุก ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ และช่วยเหลือในการจัดงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Fujimoto, S. Koga, R. Ohashi and K. Fukuhara. "Friction Spot Joining for Automotive Industry." Proceeding of International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly, Tokyo, Japan, Oct. 13-14, 2005: 173-179.
- [2] K. Tanaka and M. Kumagai. "Dissimilar Joining of Aluminum Alloy and Steel Sheets by Friction Stir Spot Welding." Proceeding of International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly, Tokyo, Japan, Oct. 13-14, 2005: 181-189.
- [3] M. Fujimoto, S. Koga, R. Ohashi and K. Fukuhara. "Friction Spot Joining for Automotive Industry." Proceeding of International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly, Tokyo, Japan, Oct. 13-14, 2005: 173-179.
- [4] Lin, P.-C., Pan, J., Pan, T., 2008a. Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 1. Welds made by a concave tool. International Journal of Fatigue 30, 74-89.
- [5] Lin, P.-C., Pan, J., Pan, T., 2008b. Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear

specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 2. Welds made by a flat tool. International Journal of Fatigue 30, 90-105.

- [6] กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ "การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุดของรอยต่อเกลียวอลูมิเนียมผสมเกรด 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 2552
- [7] Shigeki Hirasawa "Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spotwelding using particle method" Journal of Materials Processing Technology 210 (2010) 1455-1463