

การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดของรอยต่อเกยอลูมิเนียมผสมเกรด 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304

Friction Spot Joining of AA1100 Aluminum Alloy and AISI304 Stainless Steel Lap Joint

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

กลุ่มการพัฒนาระบวนการผลิตวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ที่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

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

บทคัดย่อ

บทความนี้ รายงานผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปร การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด เช่น ความเร็วในการกด ตัวกวนลงสู่รอย ต่อ ความเร็วรอบของตัวกวน และระยะเวลา กดแช่ตัวกวน ต่อความแข็งแรงของรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ผลการทดลองพบว่า รอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 สามารถเกิดขึ้นได้ดีด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด และแสดงความแข็งแรงสูงสุดของรอยต่อเกยประมาณ 95% ของความแข็งแรงของอลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุหลักในการ ทดลอง การเพิ่มความเร็วในการกดความเร็วรอบของตัวกวน และการเพิ่มระยะเวลาในการกด ทำให้ความแข็งแรงของรอย ต่อเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความเร็วยกเว้นค่าทำให้ความร้อน เสียดทานเพิ่ม และส่งผลต่อการเกาะยึดระหว่างอลูมิเนียม และเหล็ก

Abstract

This paper reports the effect of friction spot joining (FSJ) welding parameters such as a plunging speed of a tool to the joint interface, a tool rotating speed and a holding time at a specified depth on the lap joint strength of A1100 aluminum alloy and AISI 304 stainless steel. The results obtained are as following. The A1100 aluminum alloy and AISI 304 stainless steel lap join could be successfully produced by FSJ. The maximum joint strength was 95% that of the strength of

aluminum base materials. An increase of the tool plunging speed, the tool rotating speed and the holding time at the joint interface resulted in an increase of the joint strength. It seemed to be because the increase of frictional heat that affected directly the bonding between aluminum and steel.

1. บทนำ

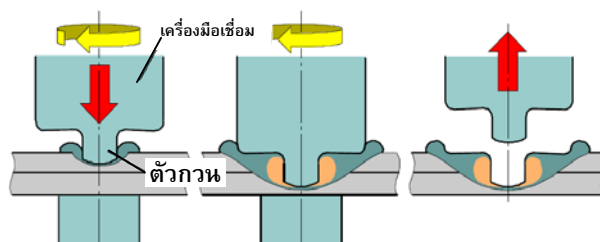
อุตสาหกรรมผลิตรถยนต์มีการนำอลูมิเนียมมาใช้ แทนชิ้นส่วนเหล็กในรถยนต์ เพื่อลดน้ำหนักของรถยนต์และ ประหยัดเชื้อเพลิง ด้วยเหตุนี้ทำให้รอยต่อของอลูมิเนียมและ เหล็กมีการใช้งานเพิ่มมากขึ้น [1-2] ในอุตสาหกรรมการผลิต รถยนต์ กระบวนการเชื่อมที่ได้รับความนิยม คือ การเชื่อมด้วย ความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding: RSW) และในอดีตมีงานวิจัยที่ประยุกต์ RSW กับการเชื่อมรอยต่อ ชนิดต่างๆ ของวัสดุชนิดเดียวกัน แต่สำหรับรอยต่อเกย ระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก มีงานวิจัยที่รายงานผลการ ทดลองไว้ไม่มากนัก เช่น Watanabe and Doi [3] ศึกษาการ เชื่อมรอยต่อเกยของอลูมิเนียมผสมกับเหล็กกล้าคาร์บอนและ พบว่าความแข็งแรงของรอยต่อลดลง เมื่อปริมาณโลหะผสม แมกนีเซียมเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารประกอบกึ่งโลหะที่เปราะมี ความหนาเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นได้รายงานผลการใช้แผ่นอลูมิเนียม A1050 เป็นแผ่นสอดระหว่างรอยต่อเกยของ A5052-SS400 และ A5086-SS400 พบค่าความแข็งแรงของรอยต่อ เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแผ่นสอดเพิ่มขึ้น Sun *et al.* [4-5] เชื่อม

ความต้านทานแบบจุดบนรอยต่ออลูมิเนียม A5052 และ เหล็กกล้า SAE 1008 โดยใช้แผ่นเหล็กเคลือบอลูมิเนียม เป็น แผ่นสอดกั้นกลางระหว่างเหล็กและอลูมิเนียม พบว่าความ แข็งแรงของรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้น และเกิดสารประกอบกึ่งโลหะ ที่ด้านอลูมิเนียมและเหล็ก ความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าสูง กว่ารอยต่อที่ต่อด้วยด้วยวิธีเวท (Self-rievet Piercing)

ถึงแม้ว่า RSW ทำให้รอยต่อมีความแข็งแรงสูงแต่ยังมีปัญหาการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะที่เปราะ และ นอกจากนั้น RSW ยังเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานมากในการ เชื่อมวัสดุ ซึ่งเป็นข้อบกพร่องในปัจจุบันที่ต้องการประหยัด พลังงานในการผลิต ด้วยเหตุนี้กระบวนการเชื่อมด้วยการ เสียดทานแบบจุด (Friction Spot Joining: FSJ) จึงถูกคิดค้น ขึ้น และได้ประยุกต์กับการต่อแผ่นวัสดุในอุตสาหกรรมการ ผลิตรถยนต์ เช่น ในโครงสร้างของรถยนต์มาสด้า รุ่น RX-8 และรุ่น Loadstar เป็นต้น [6] FSJ มีหลักการพื้นฐานดังแสดง ในรูปที่ 1 เครื่องมือเชื่อมประกอบด้วยตัวกวนที่หมุนถูกกดลง ไปในรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) จนกระทั่งปลายของตัวกวน อยู่ในระยะความลึกที่กำหนด จากนั้นความร้อนที่เกิดจากการ เสียดทานระหว่างตัวกวน และปาเครื่องมือจะทำให้วัสดุอ่อนตัว และเคลื่อนที่ไหลวนรอบตัวกวนดังรูปที่ 1 (ข) ทำให้วัสดุ เกิดการรวมตัว ตัวกวนนี้จะถูกสอดเป็นระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นตัวกวนจะถูกยกขึ้นดังรูปที่ 1 (ค) และทำให้เกิดรอยต่อขึ้น

ที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนไม่มากนักที่รายงานการ ใช้ FSJ ในการเชื่อมวัสดุ เช่น Fujimoto *et al.* [7] เชื่อมรอยต่อ เกยระหว่างอลูมิเนียมผสม 6061 กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ผลการทดลองพบว่าความแข็งแรงสูงสุดของรอยต่ออลูมิเนียม 6061 มีค่าใกล้เคียงกับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด นอกจากนี้ Tanaka and Kumagai [8] เชื่อมรอยต่อเกย อลูมิเนียม 6061 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยศึกษา ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของปลายของตัวกวนที่สอดเข้าไป ในรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าและอลูมิเนียม และความเร็ว รอบของตัวกวน พบว่ารอยต่อมีความแข็งแรงสูงสุด มี สารประกอบกึ่งโลหะก่อตัวขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรง

เนื่องจากรอยฉีกขาด (Fracture Path) ของรอยต่อไม่ได้เกิดขึ้น ผ่านแนวนี้



รูปที่ 1 กรรมวิธีการเชื่อมแรงเสียดทานแบบจุด [7]

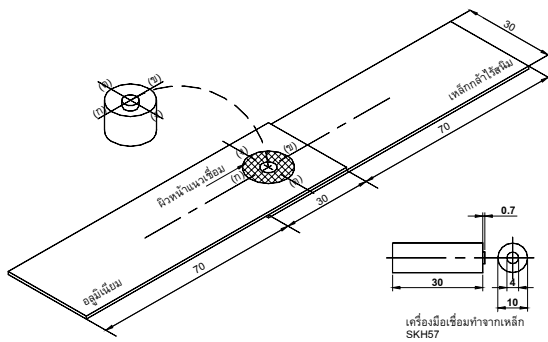
ด้วยข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าการศึกษาเกี่ยวกับ การประยุกต์ FSJ ในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียม และเหล็กมีค่อนข้างน้อย และการประยุกต์ใช้ FSJ ในการ เชื่อมอลูมิเนียมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ยัง ไม่มีการรายงานไว้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจุดประสงค์ในการ ประยุกต์ใช้ FSJ ในการเชื่อมอลูมิเนียมเกรด 1100 เข้ากับและ เหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการ เชื่อม FSJ ที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อเกย เพื่อให้ได้ รอยต่อที่มีความแข็งแรงสูงสุดที่สามารถนำไปใช้ใน อุตสาหกรรมได้ต่อไป

2. วิธีการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ อลูมิเนียมเกรด 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 แผ่นรีดความหนา 1 มม. ที่มี ส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 ชิ้นทดสอบมีขนาดยาว 100 มม. และกว้าง 30 มม. ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยทิศ ทางของการรีดขนานด้านมยาวของชิ้นทดสอบ แผ่นอลูมิเนียมวาง ต่อเกยอยู่บนแผ่นเหล็ก 30 มม. แผ่นวัสดุทั้งสองถูกยึดใน อุปกรณ์จับยึด (Jig) ที่ยึดแน่นบนแท่นเคลื่อนที่ของเครื่องกัด แบบอัตโนมัติ

เครื่องมือเชื่อมทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKH 57 มี มิติดังแสดงในรูปที่ 2 เครื่องมือเชื่อมมีปลายเป็นตัวกวนรูป ทรงกระบอก หมุนด้วยความเร็วรอบ 2000 - 3500 รอบต่อ นาที ถูกสอดเข้าไปในแนวเชื่อมผ่านแผ่นอลูมิเนียม จนกระทั่ง

ปลายตัวกวนสัมผัสกับผิวด้านบนของเหล็กกล้าไร้สนิม ความเร็วในการสอดตัวกวนจากผิวด้านบนของอลูมิเนียม จนถึงผิวด้านบนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ต่อเนื่องกันอยู่นั้นมีค่า 2-10 มม. ต่อนาที ตัวกวนที่หมุนถูกแช่ที่บริเวณขอบเขต (Interface) ระหว่างแผ่นอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม ที่ระยะเวลา 0 -5 วินาที ก่อนจะถูกดึงออกจากแนวเชื่อม รอยต่อที่ได้นำไปทดสอบความแข็งแรงของรอยต่อโดยการดึงเฉือน และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นที่เกิดการเชื่อม



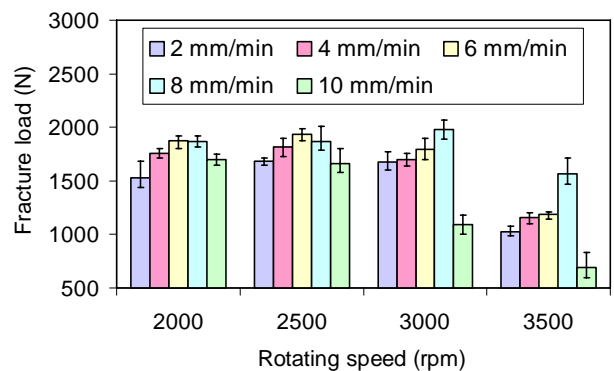
รูปที่ 2 การจัดวางรอยต่อแยกในการทดลอง

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีและความต้านทานแรงดึงของวัสดุทดลอง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

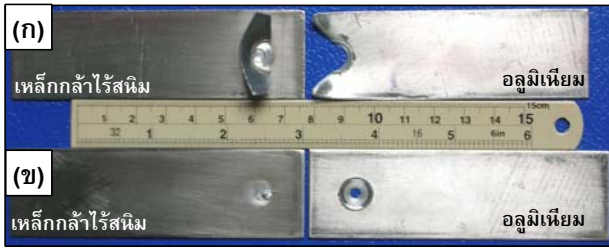
ธาตุ	อลูมิเนียม	เหล็ก
Fe	-	สมดุล
Al	สมดุล	
C	-	0.04
S	-	0.02
Cr	-	17.11
Si	0.095	0.45
Mo	-	0.08
Mn	0.05	1.31
Ni	-	7.22
P	-	0.02
Cu	0.15	-
ความต้านทานแรงดึง (MPa)	165	520

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการหมุนของตัวกวน ความเร็วในการกดตัวกวนลงสู่อินเทอร์เฟซของรอยต่อ และความแข็งแรงของรอยต่อ รอยต่อที่ทำการทดสอบในรูปนี้ ใช้เวลาในการกดแช่ที่บริเวณอินเทอร์เฟซเท่ากับ 3 วินาที ผลการทดลองพบว่าความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วในการกดตัวกวนลงไปที่อินเทอร์เฟซมีค่าเพิ่มขึ้นทุก ๆ ความเร็วรอบ แต่หากความเร็วในการกดมากเกินไป จะทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าลดลงดังแสดงที่ความเร็วกดที่ 10 มม.ต่อนาที จากความสัมพันธ์ที่ได้พบว่าที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที ความเร็วในการกดตัวกวน 8 มม.ต่อนาที และเวลาที่ใช้นอกแช่ที่อินเทอร์เฟซ 3 วินาที เป็นสภาวะที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดประมาณ 1980 นิวตัน หรือประมาณ 157 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร หรือประมาณ 95% ของความต้านทานแรงดึงของอลูมิเนียมเกรด 1100 ซึ่งแสดงค่าไว้ในตารางที่ 1 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณารูปแบบของการฉีกขาดแล้ว อาจกล่าวได้ว่ารอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมนี้ มีค่าความแข็งแรงกว่าวัสดุเนื่องจากการฉีกขาดของรอยต่อ ไม่ได้เกิดขึ้นผ่านบริเวณการเชื่อมยึดเกาะระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก แต่เกิดที่อลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุหลักดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) จึงสามารถสรุปได้ว่าสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมสามารถทำให้เกิดรอยต่อที่มีความแข็งแรงสูงได้



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบตัวกวน ความเร็วในการสอดและความแข็งแรงของรอยต่อ

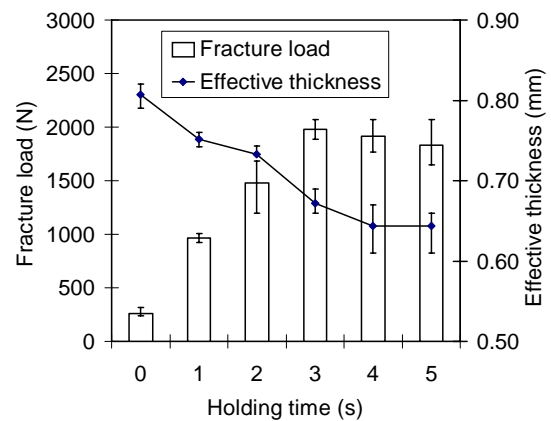


รูปที่ 4 การฉีกขาดของชิ้นทดสอบแรงดึงเงื่อนไข: (ก) รอยต่อที่มีความแข็งแรงสูงสุด และ (ข) รอยต่อที่มีความแข็งแรงต่ำสุด

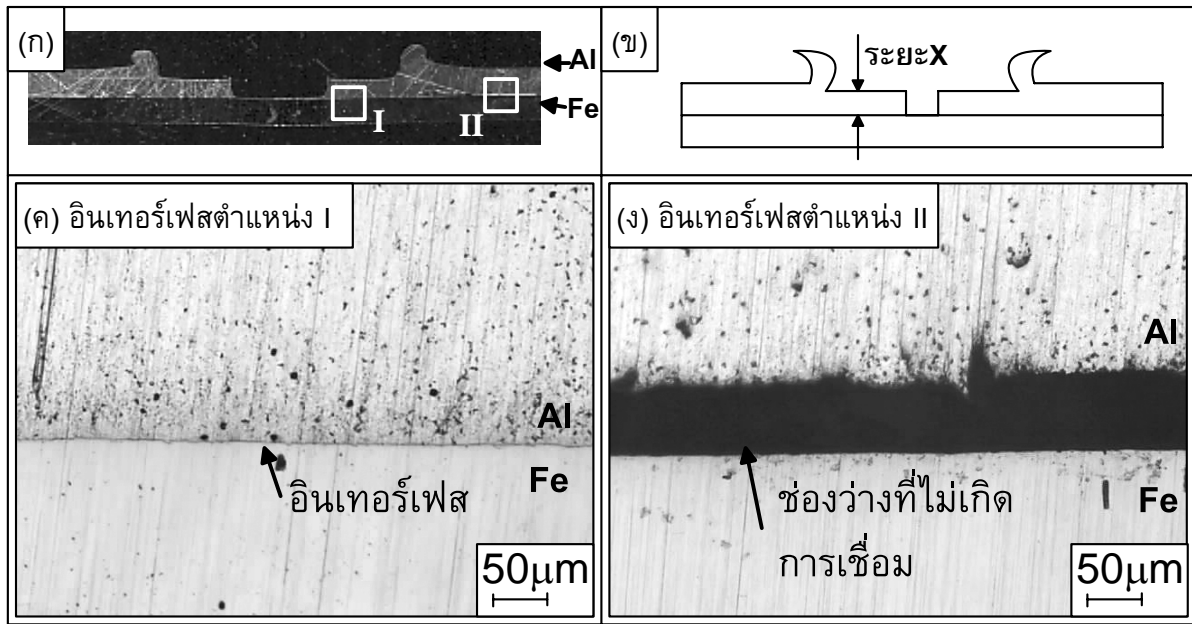
การฉีกขาดของชิ้นทดสอบในรูปที่ 3 แบ่งได้ 2 รูปแบบ คือ การฉีกขาดของชิ้นงานที่มีค่าแรงดึงสูงสุด (เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที ความเร็วในการป้อนกดตัวกวน 8 มม.ต่อนาที) จะเกิดการฉีกขาดของชิ้นงานที่บริเวณพื้นที่อลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) และการฉีกขาดที่บริเวณรอบๆ จุดเชื่อมที่ถูกดึงออกออกมา (Pulled out fracture) ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) ซึ่งเป็นการฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงต่ำสุด (เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที ความเร็วในการกดตัวกวน 10 มม.ต่อนาที) การฉีกขาดเหล่านี้ยืนยันว่ารอยต่อของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด ที่สภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมที่ความแข็งแรงมากกว่าวัสดุ และส่งผลให้เกิดการฉีกขาดที่วัสดุหลักได้ รอยฉีกขาดที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับ การเชื่อมรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนกับอลูมิเนียมผสม ที่มีแผ่นสอดระหว่างแผ่นวัสดุด้วย RSW [3-5] ซึ่งรอยต่อที่แข็งแรงต่ำจะเกิดการฉีกขาดแบบรอบ ๆ แนวเชื่อม ขณะที่รอยต่อที่มีความแข็งแรงสูงจะเกิดการฉีกขาดผ่านวัสดุอลูมิเนียม

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการกดและค่าความแข็งแรงของรอยต่อ โดยทำการเชื่อมด้วยตัวแปรการเชื่อม ที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดในรูปที่ 3 และทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการกดแช่ที่อินเทอร์เฟส 0 ถึง 5 วินาที ผลการทดสอบความแข็งแรงพบว่า หากทำการเชื่อมโดยระยะเวลาการกดแช่เท่ากับ 0 วินาที ค่าความแข็งแรง

ของรอยต่อมีค่าต่ำ คาดว่าเกิดจากความร้อนเสียดทานที่บริเวณอินเทอร์เฟสมีค่าไม่เพียงพอ ที่ทำให้อลูมิเนียมและเหล็กเกาะยึดกันไม่ได้ดี อย่างไรก็ตามข้อคาดการณ์นี้ จำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาต่อไปในอนาคต ขณะเดียวกันเมื่อระยะเวลาในการกดแช่เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาการกดแช่ 3 วินาที และเมื่อระยะเวลาในการกดแช่เพิ่มขึ้นเป็น 4 และ 5 วินาที ความแข็งแรงของรอยต่อลดต่ำลง วัดความหนาของอลูมิเนียมที่ด้านล่างของบ่าเครื่องมือบริเวณ X ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) ที่ระยะเวลาการกดแช่ต่างๆ พบว่าความหนาของอลูมิเนียมด้านล่างของบ่าเครื่องมือลดลง เมื่อระยะเวลาการกดแช่เพิ่มขึ้น และส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่าความหนาของอลูมิเนียมที่ด้านล่างของบ่าเครื่องมือเชื่อม มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อ แต่สาเหตุที่แท้จริงควรมีการศึกษาต่อไป



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยต่อ เวลาการกดแช่และค่าความหนาของอลูมิเนียมด้านล่างบ่าเครื่องมือ (ระยะ X)



รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานแข็งแรงสูงสุด: (ก) โครงสร้างมหภาค (ข) ตำแหน่งการวัดค่าความหนาของอลูมิเนียมด้านล่างปากเครื่องมือ (ระยะ X) (ค) อินเทอร์เฟซตำแหน่ง I และ (ง) อินเทอร์เฟซตำแหน่ง II

รูปที่ 6 (ก) แสดงโครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่แสดงค่าความแข็งแรง 1980 นิวตัน ทำการวัดขอบเขตของชิ้นงานที่ได้ใหม่ดังรูปที่ 6 (ข) พบว่าจะมีส่วนของอลูมิเนียมที่กัดตัวขึ้นมาและพื้นผิวของอลูมิเนียมถูกกัดสึกไปที่อินเทอร์เฟซของชิ้นงาน ทำการเปรียบเทียบอินเทอร์เฟซของรอยต่อบริเวณที่พื้นที่ภายใต้เครื่องมือเชื่อม ที่เกิดการเกาะยึดกันของอลูมิเนียมและเหล็กดังแสดงในรูปที่ 6 (ค) และพื้นที่เป็นการประกบกันระหว่างแผ่นอลูมิเนียมและเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 6 (ง) จะสามารถแบ่งแยกลักษณะการเชื่อมยึดที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการ FSJ ได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามกลไกการเกิดและลักษณะของเฟสที่เกิดขึ้นบริเวณการเชื่อมนี้ จำเป็นต้องศึกษาอย่างละเอียดด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Transmission Electron Microscope: TEM) หรือการวัดการหักเหของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) ต่อไป เพื่ออธิบายลักษณะการเกาะยึดที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อมต่อไป

4. สรุป

งานวิจัยนี้ประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดกับรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมเกรด 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 และศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติทางกลของรอยต่อ ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

- 1) รอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมเกรด 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 สามารถเชื่อมติดกันและมีความแข็งแรงสูงสุดประมาณ 95% ของความแข็งแรงของอลูมิเนียมเกรด 1010
- 2) สภาวะการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด คือ ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที ความเร็วในการกดตัวทวนลงไปในแนวเชื่อม 8 มม. ต่อนาที และเวลาในการกดแช่ 3 วินาที
- 3) การเพิ่มความเร็วยรอบ ความเร็วในการกดตัวทวนลงสู่รอยต่อ และเวลาในการกดแช่ที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อ ทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อเกยเพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณนิรันดร์ เขียมสะอาด คุณธวัชชัย นามวิเศษ และเจ้าหน้าที่กลุ่มการพัฒนากระบวนการผลิตวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำหรับการสนับสนุนทางด้านเทคนิคในการเตรียมชิ้นทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. Sun and R. Karppi, R. "The Application of Electron Beam Welding for the Joining of Dissimilar Metals: An Overview." *Journal of Materials Processing Technology*, 59 (1996) 257-267.
- [2] T.A. Branes and I.R. Pashyby. "Joining Techniques for Aluminum Spaceframes used in Automobiles Part I-Solid and Liquid Phase Welding." *J. of Materials Processing Technology*, 99 (2000) 62-71.
- [3] T. Watanabe and H. Doi. "Resistance Spot Welding of Mild Steel to Al-Mg Alloy." *Proceeding of International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly*, Tokyo, Japan, Oct. 13-14, 2005: 117-123.
- [4] X. Sun, E.V. Stephens, M.A. Khaleel, H. Shao and M. Kimchi. "Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy to Steel with Transition Material - From Process to Performance - Part I: Experimental Study." *Welding Journal*, 83-7 (2004) 188s-195s.
- [5] X. Sun and M.A. Khaleel "Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy to Steel with Transition Material - From Process to Performance - Part II: Finite Element Analyses of Nugget Growth." *Welding Journal*, 83-6 (2004) 197s-202s.
- [6] www.aluminum.org, September 2006.
- [7] 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.
- [8] 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.