

การเชื่อมฟริกชันสเตอโรลูมิเนียมผสมเกรด A5083 และเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400

Friction Stir Welding of A5083 Aluminum Alloy and SS400 Low Carbon Steel

ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงษ์

Kittipong Kimapong

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัด

ปทุมธานี 12110 โทร. 0-2549-3492-2 โทรสาร 0-2549-3490

E-mail jomyut@rmut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการเชื่อมรอยต่อแผ่นอลูมิเนียมผสมและแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยกรรมวิธีการเชื่อมฟริกชันสเตอโรโดยมีการศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อ เช่น ความเร็วรอบในการหมุนของตัวกวน ระยะตำแหน่งของตัวกวนในรอยต่อ และขนาดความโตของตัวกวน ผลการทดลองที่ได้คือ รอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำสามารถทำการเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการเชื่อมฟริกชันสเตอโร ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่าประมาณร้อยละ 86 ของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของอลูมิเนียมผสมเสียเล็กน้อยของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเข้าสู่แนวเชื่อมก่อให้เกิดการร้าวของรอยต่อตามแนวเชื่อมของเหล็กและอลูมิเนียม

ABSTRACT

This paper proposes an application of a friction stir welding to butt-weld an aluminum alloy plate to a low carbon steel plate. The effects of pin rotation speed, position of the pin axis and pin diameters on tensile strength and microstructure of the joint were investigated. Butt joint welding of an aluminum alloy plate was easily and successfully achieved. The maximum tensile strength of the joint was about 86% of that of the aluminum alloy base metal. Many fragments of the steel were scattered in the aluminum alloy matrix and a fracture tended to occur along the interface between the fragment and the aluminum matrix. A small amount of intermetallic compound was also often formed at the interface between the steel fragments and the aluminum matrix. The regions where the intermetallic compounds formed seemed to be fracture paths in a joint.

1. บทนำ

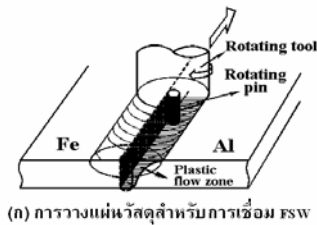
การลดน้ำหนักรถยนต์เป็นหนึ่งในกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการประหยัดเชื้อเพลิงและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ วัสดุที่มีน้ำหนักเบา เช่น อลูมิเนียมผสมได้มีการนำมาใช้ทดแทนชิ้นส่วนบางตัวที่ทำจากเหล็กด้วยเหตุนี้จึงมีความ

พยายามในการเชื่อมอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กกล้าด้วยกรรมวิธีต่างๆ อย่างไรก็ตาม การเชื่อมที่ทำให้เกิดรอยเชื่อมที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นไปได้ด้วยความยากลำบาก เนื่องจากสารประกอบกึ่งโลหะที่เปราะมักก่อตัวขึ้นในแนวเชื่อม ที่ผ่านมานักวิจัยได้ศึกษาการเชื่อมอลูมิเนียมผสมเข้ากับเหล็กด้วยกระบวนการเชื่อมต่างๆ และแต่ละกระบวนการก็แสดงข้อจำกัดในการเชื่อมให้ทราบ เช่น การเชื่อมด้วยความต้านทาน (Friction Welding) มีข้อจำกัดที่ชิ้นงานอย่างน้อยหนึ่งข้างจะต้องมีภาคตัดเป็นทรงกลม [1] การเชื่อมด้วยอัลตราโซนิก (Ultrasonic Welding) วิธีการนี้มีใช้งานไม่บ่อยแพร่หลายและใช้กับวัสดุบางเท่านั้น [2] การเชื่อมแบบใช้แสงเลเซอร์ (Laser Welding) เป็นอีกวิธีที่ใช้ในการเชื่อมอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กกรรมวิธีนี้ยากต่อการควบคุมความร้อนแนวเชื่อม (Heat Input) ก่อให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะที่เปราะและอุปกรณ์ในการเชื่อมมีราคาสูง [3] การเชื่อมฟริกชันสเตอโร (Friction Stir Welding: FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมที่มีการคิดค้นโดยสถาบันการเชื่อม (The Welding Institute: TWI) ประเทศอังกฤษ [4] และเป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งที่อุณหภูมิการเชื่อมต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุ ซึ่งเป็นผลดีทำให้วัสดุไม่เกิดการหลอมละลาย และในกรณีการเชื่อมรอยต่อของเหล็กและอลูมิเนียม คาดว่าการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะที่เปราะจะมีปริมาณลดลงหรือถูกกำจัดออก ที่ผ่านมานักวิจัยที่นำการประยุกต์ FSW ในการเชื่อมอลูมิเนียมกับเหล็กไม่มากนัก [5-6] ด้วยเหตุนี้ผู้เขียนจึงมีจุดประสงค์ในการใช้ FSW ในการเชื่อมรอยต่อชนอลูมิเนียมผสม A5083 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 และศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อกลสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ

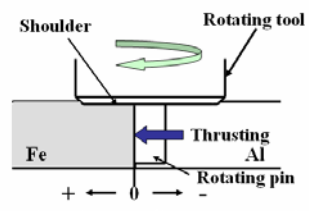
2. วิธีการทดลอง

รูป 1 (ก) แสดงลักษณะการเดินแนวเชื่อมบนรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก วิธีการเชื่อม คือ ตัวกวนที่หมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนดจะถูกกดลงไปบนอลูมิเนียม จากนั้นตัวกวนจะเคลื่อนที่ในแนวขนานเข้าหาผิวด้านข้างแผ่นเหล็กดังแสดงในรูปที่ 1(ข) ผิวด้านข้างของตัวกวนที่หมุนจะขัดและกำจัดชั้นพื้นผิวบางๆ ของแผ่นเหล็กทำให้เกิดการกระตุ้น เรียกว่า “ผิวกระตุ้น (Activated Surface)” [5] ขณะเดียวกันอลูมิเนียม

ที่อ่อนตัวเนื่องจากความร้อนแรงเสียดทานระหว่างตัวกวนและวัสดุ จะ ถูกดันเข้าไปหาผิวกระตุ้น และเกิดการเชื่อมยึดกันระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก เนื่องจากกระบวนการนี้ตัวกวนถูกกดลงในอลูมิเนียมซึ่งความแข็งต่ำกว่าเหล็ก และปลายของตัวกวนไม่ได้สัมผัสกับเหล็กจึงทำให้เกิดการสึกกร่อน (Wear) ของตัวกวนค่อนข้างน้อยเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมแบบฟริกชันสเตอร์ที่ค้นพบโดย TWI ความแตกต่างระหว่างกระบวนการ คือ ตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกวนและแนวรอยต่อของกรรมวิธีที่คิดค้นโดย TWI จะต้องเป็นแนวเดียวกัน ขณะที่ในการวิจัยนี้ไม่จำเป็นต้องเป็นแนวเดียวกัน นอกจากนี้ในรายงานผลการศึกษาก่อนหน้านี้ [5] พบว่า หากตำแหน่งดังกล่าวเป็นแนวเดียวกันในกรณีการเชื่อมอลูมิเนียมกับเหล็ก รอยเชื่อมจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากตัวกวนเกิดการแตกหักและเป็นสาเหตุให้วัสดุรอบๆ ตัวกวนไม่เกิดการไหลวนรอบๆ ตัวกวน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ไม่ทำให้เกิดแนวเชื่อม



(ก) การวางแนววัสดุสำหรับการเชื่อม FSW



(ข) ตำแหน่งการวางตัวกวนบริเวณรอยต่อ

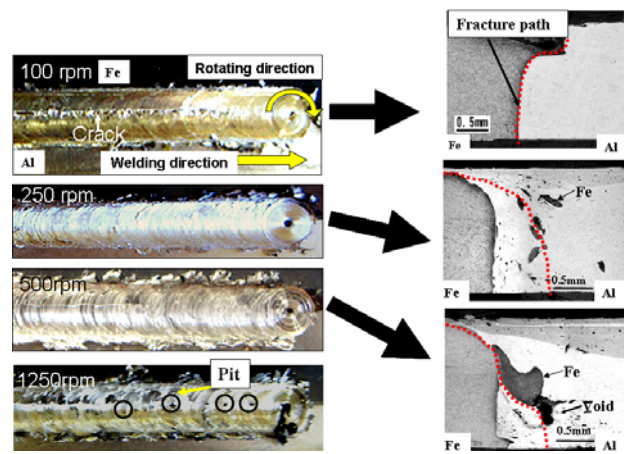
รูปที่ 1 การเชื่อม FSW และวางตำแหน่งตัวกวน

วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้คือแผ่นอลูมิเนียมผสม A5083 (Al-5.0%Mg-0.5%Mn%โดยน้ำหนัก) และเหล็กกล้า SS400 (Fe-0.15%C %โดยน้ำหนัก) ความหนา 2 มม. ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของอลูมิเนียมคือ 275 MPa และของเหล็กคือ 455 MPa อลูมิเนียมเกรด A5083 เป็นอลูมิเนียมที่มีแมกนีเซียมผสมอยู่เพื่อทำให้เกิดการเพิ่มความแข็งแรง (Solid Solution Strengthening) ของเนื้ออลูมิเนียมหลัก (Matrix) มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนด้วยสารละลายคลอไรด์สามารถนำมาทำการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน และมีความสามารถในการเชื่อม (Weldability) สูง ในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ใช้ในการผลิตล้อรถยนต์ หรือโครงสร้างรอง (Sub-frame) [7] ขณะที่เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 เป็นเหล็กกล้าที่มีความเหนียวที่มีการนำมาทำโครงสร้างของตัวถังรถยนต์ [8] แผ่นวัสดุถูกตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาดกว้าง 40 มม. ยาว 140 มม. เครื่องมือเชื่อมทำจากเหล็กกล้าความเร็วสูง เบอร์ JIS-SKH-57 โดยย่อ (Tool Shoulder) ของเครื่องมือมี

เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. ตัวกวนมีรูปร่างทรงกระบอกไม่มีเกลียวเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ถึง 4 มม. ความยาวของตัวกวนวัดจากปากเครื่องมือถึงปลายสุดของตัวกวน คือ 1.8 มม. ตัวแปรการเชื่อมที่ใช้ทำการเชื่อม คือ ความเร็วรอบของตัวกวน (Rotational Speed) ตามเข็มนาฬิกา 100 ถึง 1250 รอบ/นาที ความเร็วเชื่อม (Welding Speed) 25 มม./นาที อลูมิเนียมจัดวางไว้ที่ด้านรีทริทิง (Retreating Side) ตัวกวนถูกดันเข้าหาชิ้นงานของแผ่นเหล็ก (Thrusting Distance) ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) คือ -0.2 ถึง 2.0 มม. โดยตำแหน่ง 0.0 มม. คือ ตำแหน่งด้านข้างของตัวกวนสัมผัสพอดีกับด้านข้างของแผ่นเหล็ก การทดสอบแรงดึง (Tensile test) ของรอยเชื่อมต่อ ชิ้นทดสอบจะตัดจากชิ้นงานเชื่อมในตำแหน่งที่เกิดการพังทลาย โดยตัดให้ทิศทางตั้งฉากกับแนวเชื่อมและให้แนวเชื่อมอยู่ตำแหน่งกลางของชิ้นทดสอบ ชิ้นทดสอบสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ถูกเตรียมลักษณะเดียวกันกับชิ้นทดสอบแรงดึง จากนั้นชิ้นทดสอบจะถูกขัดตามขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ซึ่งงานที่ผ่านการขัดจนมีความมันวาวจะถูกนำมากัดโครงสร้างเฉพาะด้านของเหล็กด้วยสารละลายไนตรล 3% เพื่อแสดงความแตกต่างของแนวเชื่อม ชิ้นงานถูกนำมาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด (Scanning Electron Microscope: SEM) ที่ต่อเชื่อมกับการวิเคราะห์กระจายตัวของพลังงานรังสีเอ็กซ์ (X-ray Energy-dispersive Spectroscopy: EDS)

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

3.1 อิทธิพลความเร็วรอบตัวกวน



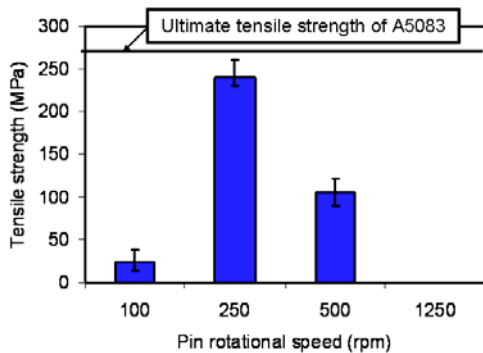
(ก) ผิวหน้า

(ข) โครงสร้างมหภาค

รูปที่ 2 ผิวหน้าแนวเชื่อมและโครงสร้างมหภาคที่ดึงจากของแนวเชื่อมที่ความเร็วรอบต่างๆ

แนวเชื่อมถูกเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 100-1250 รอบ/นาที ระยะของตัวกวนสอดเข้าไปในเนื้อเหล็กมีค่า 0.2 มม. และความโตของตัวกวน 2 มม. รูปที่ 2(ก) แสดงผิวหน้าแนวเชื่อม และรูปที่ 2(ข) แสดง

โครงสร้างภาคตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อมที่ความเร็วรอบต่างๆ ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงรอยต่อและความเร็วรอบแสดงในรูปที่ 3 เมื่อความเร็วรอบต่ำสุด 100 รอบ/นาที ตัวกวนเกิดสีกร่อน และพังทลายในระยะเวลาที่ค่อนข้างสั้น เนื่องจากความร้อนจากแรงเสียดทานน้อยเกินไปและไม่เพียงพอในการทำให้อลูมิเนียมเกิดการอ่อนตัว แนวเชื่อมจึงเกิดขึ้นบริเวณที่ผิวหน้าแนวเชื่อมเท่านั้น แนวการพังทลาย (Fracture Path) ซึ่งแสดงโดยเส้นประเกิดการพังทลายตามอินเทอร์เฟซของรอยต่อตามแนวการเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงต่ำ



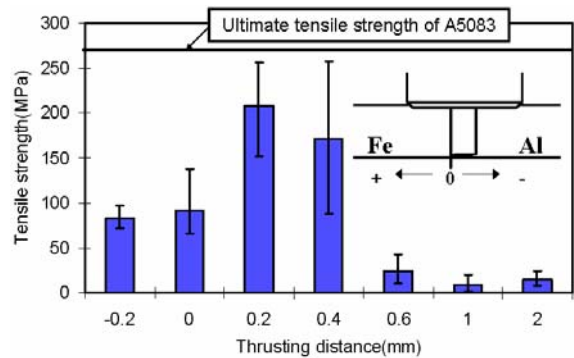
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยต่อและความเร็วรอบ

ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ทำให้เกิดแนวเชื่อมที่สมบูรณ์และแสดงค่าความแข็งแรงสูงสุด 240 MPa ซึ่งมีค่าประมาณ 86% ของอลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุ การพังทลายเกิดขึ้นตามรอยต่อของอลูมิเนียมและเหล็กในพื้นหลักอลูมิเนียม (Aluminum Matrix) ดังแสดงในรูปที่ 3 วิเคราะห์ด้วย EDS พบว่าส่วนพื้นที่เล็กๆ นี้มีส่วนผสมใกล้เคียงกับเหล็กที่ถูกดันออกมาเนื่องจากการขัดสีของตัวกวน ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ผิวหน้าแนวเชื่อมมีลักษณะคล้ายกับความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที แต่ความแข็งแรงของรอยต่อต่ำลง เมื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาคพบว่ามีจุดบกพร่องเกิดขึ้น และการพังทลายเกิดตามรอยต่อของอลูมิเนียมและเหล็ก ที่ความเร็วรอบสูงสุด 1250 รอบ/นาที ผิวหน้าของแนวเชื่อมเกิดการร้าวสีดำ ลักษณะเหมือนผิวหน้าเกิดการเผาไหม้แต่ในการทดลองนี้ไม่ได้วิเคราะห์การเกิดที่จุดนี้ แนวเชื่อมที่ได้ไม่สมบูรณ์และไม่สามารถเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงได้ซึ่งทำให้ค่าความแข็งแรงเป็นศูนย์

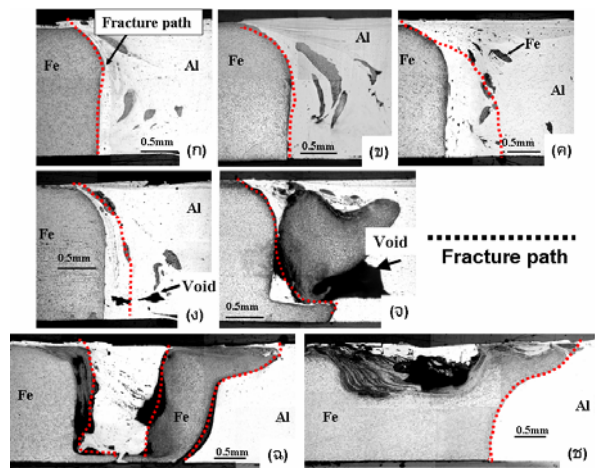
3.2 อิทธิพลระยะการวางตัวกวน

รูปที่ 4 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งของตัวกวนต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม ที่ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 25 มม/นาที เมื่อตำแหน่งของตัวกวนมีค่าเป็นศูนย์หรือลบ ด้านข้างตัวกวนมีตำแหน่งสัมผัสหรือไม่สัมผัสเหล็กและอยู่ในด้านอลูมิเนียม พบว่าค่าความแข็งแรงของรอยต่อค่อนข้างต่ำ เนื่องจากการขัดผิวเหล็กเพื่อสร้างผิวกระตุ้นน้อยกว่า การพังทลายตามรอยต่อของอลูมิเนียมพื้นหลักและ

ส่วนเล็กๆ ของเหล็กดึงเส้นประในรูปที่ 5 เมื่อระยะตำแหน่งของตัวกวนเพิ่มเป็น 0.2 มม. ซึ่งแสดงค่าความแข็งแรงสูงสุด ผิวกระตุ้นถูกสร้างเพียงพอทำให้เกิดการเกาะยึดระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กเพิ่มขึ้น และแนวการพังทลายเลื่อนเข้ามาในบริเวณอลูมิเนียมพื้นหลัก ตามรอยต่อของส่วนของเหล็กในอลูมิเนียมดังแสดงโดยเส้นประในรูปที่ 5 เมื่อระยะตำแหน่งของตัวกวนเพิ่มขึ้นเป็น 0.6 ถึง 2.0 มม. ส่วนของเหล็กถูกดันเข้ามาในแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น และจุดบกพร่องขนาดใหญ่สามารถตรวจพบ และเป็นสาเหตุทำให้เกิดการลดลงของความแข็งแรงของรอยต่อ นอกจากนี้ที่ระยะ 1.0 และ 2.0 มม. ตัวกวนเกิดการสีกร่อนและหักออก เมื่อระยะเพิ่มเป็น 2.0 มม. ตัวกวนเกิดการสีกร่อนและหักออกอย่างรวดเร็ว ทำให้แนวเชื่อมเกิดการเชื่อมเฉพาะบริเวณใกล้กับบ่าของเครื่องมือทำให้แสดงค่าความแข็งแรงของรอยต่อค่อนข้างต่ำ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงและตำแหน่งตัวกวน

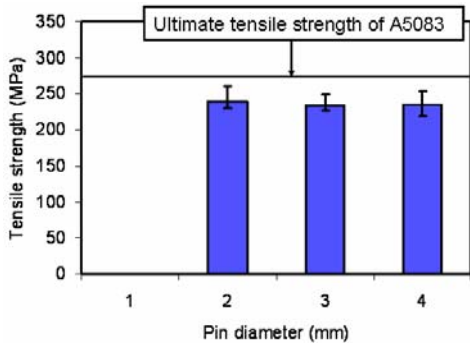


รูปที่ 5 โครงสร้างมหภาคตัดตั้งฉากกับทิศทางกระตุ้นแนวเชื่อมที่ระยะตำแหน่งตัวกวนต่างๆ

3.3 อิทธิพลความโตของตัวกวน

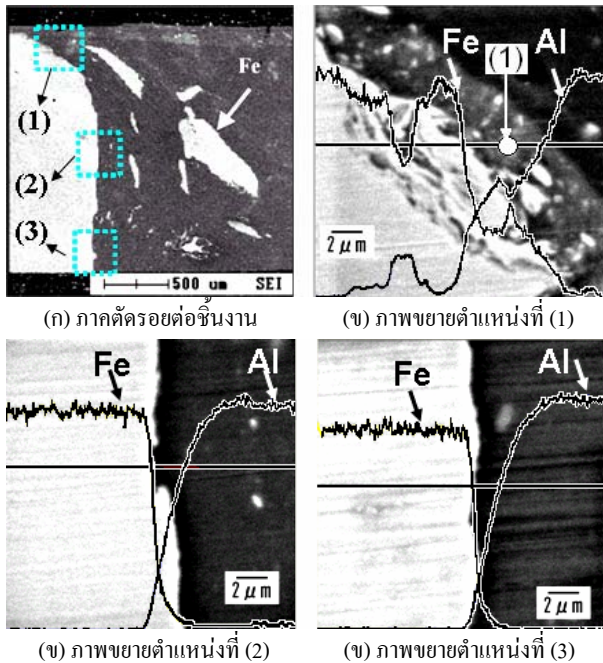
แนวเชื่อมถูกเชื่อมด้วยตัวกวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ถึง 4 มม. ความเร็วรอบ 250 รอบ/นาที ระยะตำแหน่งตัวกวน 0.2 มม.

ความสัมพันธ์ระหว่างความโตของตัวแกนและความแข็งแรงของรอยต่อ แสดงไว้ในรูปที่ 6 เมื่อตัวแกนมีความโต 1 มม. รอยต่อไม่สามารถเชื่อมได้เนื่องจากตัวแกนเกิดการพังทลายเมื่อเริ่มเคลื่อนตัวจากจุดเริ่มต้นเพียงเล็กน้อย ขณะที่ความโตของตัวแกนเพิ่มขึ้นเป็น 2 ถึง 4 มม. ค่าความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าใกล้เคียงกันและ โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมของตัวแกนความโต 3 ถึง 4 มม. มีลักษณะคล้ายกับความโตของตัวแกน 2 มม. ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5 (ค)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยต่อและเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวแกน

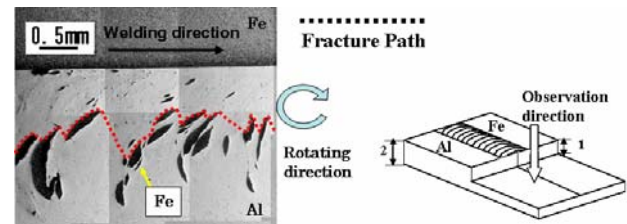
3.4 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ



รูปที่ 7 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยต่อ

รูปที่ 7 (ก) แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อตั้งจากการเดินแนวเชื่อม ที่แสดงความแข็งแรงสูงที่สุดในการทดลองนี้ ตำแหน่ง (1) (2) และ (3) ได้นำมาวิเคราะห์การกระจายตัวพลังงาน

รังสีเอ็กซ์แบบเส้น (X-ray Energy-dispersive line analysis) เพื่อวิเคราะห์การก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะ ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 7 (ข) ถึง (ง) ที่บริเวณด้านบนของรอยต่อใกล้กับบ่าเครื่องมือแถบต่างๆ ของสารประกอบกึ่งโลหะก่อตัวขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7 (ข) แต่ตำแหน่งกึ่งกลางและด้านล่างของรอยต่อไม่มีการก่อตัวของ IMC วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของสารประกอบกึ่งโลหะที่เกิดขึ้นที่จุด (1) พบว่าส่วนผสมทางเคมีมีค่าใกล้เคียงสารประกอบกึ่งโลหะ FeAl₃ (19.16%Fe-70.26%Al-5.27%Mg-4.86%O, %โดยอะตอม) เมื่อเปรียบเทียบกับสารประกอบกึ่งโลหะที่เกิดขึ้นในแผนภาพสมดุลเหล็กและอลูมิเนียม [9] ซึ่งเป็นเฟสที่แข็งเปราะวัดค่าความแข็งได้ประมาณ 641 HV_{0.01} การสังเกตการพังทลายของชิ้นทดสอบ พบว่าเกิดขึ้นที่บริเวณเฟสนี้ก่อนขยายตัวลงสู่ด้านล่างของรอยต่อ จึงอาจกล่าวได้ว่า การก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อลดลง การก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะที่บริเวณใกล้เคียงบ่าของเครื่องมือ เนื่องจากบริเวณแสดงค่าอุณหภูมิของรอยเชื่อมสูงสุดในกระบวนการ FSW ทำให้สารประกอบย่อยต่อการก่อตัวขึ้น [10]



(ก) โครงสร้างภายในแนวเชื่อม (ข) ตำแหน่งการตรวจสอบรูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคนานกับทิศทางเชื่อมสังเกตจากภาพด้านบนรอยเชื่อม

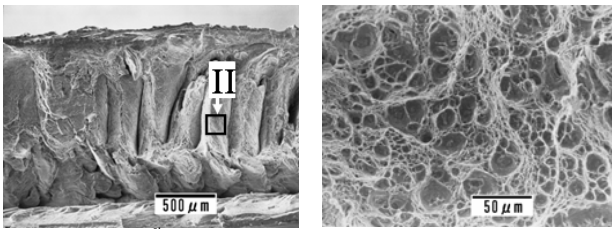
ส่วนของเหล็กที่ถูกดันเข้ามาในแนวเชื่อมนี้เกิดขึ้นก่อนข้างสม่ำเสมอภายในแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 8(ก) ซึ่งแสดงโครงสร้างของรอยต่อที่บริเวณความลึกประมาณ 1 มิลลิเมตรจากผิวด้านบนของแนวเชื่อม และมีทิศทางตรวจสอบดังแสดงในรูปที่ 8 (ข) ส่วนเล็กๆ ของเหล็กถูกขัดและดันเข้าไปอยู่ในแนวเชื่อมและก่อให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความแปรปรวนอินเทอร์เฟซของส่วนของเหล็กและอลูมิเนียมพื้นหลัก ผลที่เกิดขึ้นนี้เป็นสาเหตุทำให้รอยต่อเกิดการพังทลายตามแนวการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะดังแสดงโดยเส้นประในรูปที่ 8 (ก)

รูปที่ 9(ก) แสดงภาพถ่ายรอยแตกหักด้านอลูมิเนียมและเหล็กของชิ้นทดสอบที่แสดงค่าแรงดึงสูงสุด ภาพขยายของรอยแตกหักด้านอลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 9 (ข) แสดงลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอของรอยแตกหักซึ่งคาดว่าเป็นตำแหน่งการแตกหักที่เกิดขึ้นบริเวณอินเทอร์เฟซของส่วนของเหล็กที่อยู่ในพื้นหลักอลูมิเนียมดังแสดงด้วยเส้นประในรูป

ที่ 8(ก) ขณะผิวที่มีความสม่ำเสมอคาดว่าการแตกหักเกิดที่บริเวณ อลูมิเนียมพื้นหลัก ภาพขยายกำลังสูงของรอยแตกหักแสดงรูปแบบการแตกหักแบบดิมเปิล (Dimple pattern) ซึ่งบ่งชี้ให้ทราบว่าเกิดการแตกหักแบบเหนียว (Ductile mode) ดังในรูปที่ 9(ค)



(ก) ภาพถ่ายรอยแตกหัก



(ข) ภาพขยายพื้นที่ I ในรูป ก.

(ค) รอยแตกหักแบบดิมเปิลในสี่เหลี่ยม II

รูปที่ 9 รอยแตกหักของชิ้นทดสอบ: (ก) ภาพถ่ายรอยแตกหักด้านเหล็กและอลูมิเนียม, (ข) ภาพขยายพื้นที่ I ในรูป ก. และ (ค) รอย

4. สรุปผล

- 1) การปรับตำแหน่งของตัวกวนเข้าหาและออกจากผิวรอยต่อของแผ่นเหล็กเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กแนวเชื่อมสามารถเกิดได้โดยวางชิ้นงานอยู่ที่ด้านรีทริทิ่ง
- 2) รอยต่อที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดสามารถเชื่อมได้ด้วยค่าความเร็วรอบที่ทำให้เกิดรอยต่อที่สมบูรณ์ คือ 250 รอบต่อนาที ความเร็วรอบที่ต่ำเกินไปทำให้เกิดความร้อนในแนวเชื่อมที่ไม่เพียงพอต่อการเชื่อม และเป็นสาเหตุให้ตัวกวนเกิดการสึกกร่อนและแตกหัก ขณะที่ความเร็วรอบที่สูงเกินไปทำให้เกิดความร้อนที่สูงเกินไป แนวเชื่อมเกิดการเผาไหม้และทำให้รอยต่อไม่สมบูรณ์
- 3) รอยต่อที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดสามารถเชื่อมได้ด้วยค่าระยะตำแหน่งตัวกวน 0.2 มม. ค่าระยะตำแหน่งตัวกวนที่มากทำให้เกิดดินเหล็กเข้ามาในแนวเชื่อมมากเกินไป ก่อให้เกิดความไม่สมบูรณ์ของรอยเชื่อมและตัวกวนง่ายต่อการแตกหัก

- 4) สารประกอบกึ่งโลหะที่มีความเปราะเกิดการก่อตัวที่บริเวณผิวหน้าของแนวเชื่อมเนื่องจากความร้อนที่สูงขึ้นและเป็นสาเหตุที่ทำให้รอยต่อมีค่าความแข็งแรงลดลง
- 5) ขนาดความโตของตัวกวนขนาด 2 ถึง 4 มม. มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการกลสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ

เอกสารอ้างอิง

[1] M. Aritoshi and K. Okita, "Friction Welding of Dissimilar Metals", J. of JWS. 71-6 (2002) 432-436.

[2] T. Watanabe, A. Yoneda, "A study on Ultrasonic Welding of Dissimilar Metals", Q. J. of JWS. 17-5 (1999) 223-242.

[3] M.J. Rathod and M. Kutsuna, "Joining of Aluminum Alloy 5052 and Low-Carbon Steel by Laser Roll Welding", Welding J. 83-1 (2004) 16s-26s.

[4] W.M. Thomas and E.D. Nicholas, "Friction Stir Welding for The Transportation Industries", Materials&Design 18 (1997) 269-273.

[5] T. Watanabe, H. Takayama and K. Kimapong, "Joining of Steel to Aluminum Alloy by Interface-activated Adhesion Welding", Materials Science Forum 426-432 (2003) 4129-4134.

[6] K. Yoshikawa and T. Hirano, "Numerically Controlled Friction Stir Welding in Layered Dissimilar Metal Materials of Aluminum and Steel", Proceed. of 3rd Inter. Symp. on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, Sept. 27-28, 2001, 1-11.

[7] J.A. van der Hoeven, L. Zhuang, B. Schepers, P. De Smet and J.P. Baeklandt, www.sae.org, Paper No. 2002-02-2128, pp. 750-754.

[8] www.key-to-metal, SS400 steel, June 2003.

[9] U.R. Kattner and T.B. Massalski, Binary Alloy Phase Diagrams (ASM International, Material Park, OH, 1990) P. 147.

[10] P. Ulysse, "Three Dimensional Modeling of the Friction Stir Welding Process", Int. J. of Machine Tools&Manu. 42 (2002) 1549-1557.