

# การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุอลูมิเนียมเชิงประกอบ : กระบวนการและเครื่องมือ

รุ่งวสันต์ ไกรกลาง จริยาภรณ์ อุ๋นวงษ์\* จรวยพร แสนทวีสุข และ วรพจน์ ศิริรักษ์

## บทคัดย่อ

อลูมิเนียมเชิงประกอบเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักจึงนิยมประยุกต์ใช้สำหรับผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมอากาศยาน การขึ้นรูปอลูมิเนียมเชิงประกอบด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถลดการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างอลูมิเนียมเนื้อพื้นกับสารเสริมแรงที่เป็นสาเหตุของการเกิดรอยตำหนิและเฟสไม่พึงประสงค์ของแนวเชื่อม และยังเป็นกระบวนการที่ได้แนวเชื่อมที่มีคุณภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม บทความนี้รวบรวมรายงานการศึกษาที่สำคัญช่วงระยะเวลา 15 ปีย้อนหลังจำนวน 32 เรื่อง ของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสำหรับวัสดุอลูมิเนียมเชิงประกอบ ซึ่งประกอบด้วย การเลือกวัสดุ ทำเครื่องมือ รูปทรงเครื่องมือ การสึกหรอของเครื่องมือ และปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพแนวเชื่อม เพื่อเป็นข้อมูลแนวทางการพัฒนากระบวนการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมเชิงประกอบที่มีข้อจำกัดของอัตราการสึกหรอของเครื่องมือที่รุนแรงจากการเสียดสีของอนุภาคเสริมแรงซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมและต้นทุนการผลิต ผลลัพธ์จากการศึกษาและการพัฒนาสามารถประยุกต์ใช้องค์ความรู้กับระบบการขนส่งทางรางซึ่งสอดคล้องกับสถานการณ์ความต้องการของประเทศ

**คำสำคัญ :** อลูมิเนียมเชิงประกอบ, การเชื่อมเสียดทานแบบกวน, การสึกหรอของเครื่องมือ

## **Friction Stir Welding of Aluminum Matrix Composites : Processes and Tools**

**Rungwasun Kraiklang, Jariyaporn Onwong<sup>\*</sup>, Charuayporn Santhaweesuk and Worapot Sirirak**

### **Abstract**

Aluminum Matrix Composites (AMCs) are a high strength to weight ratio materials, thus, they are widely used in the automotive and aerospace industries. The processing of AMCs by Friction Stir Welding (FSW) diminishes chemical reaction between an aluminum matrix and reinforced materials which are sources of porosity, casting defects, and undesired phases in weld line. FSW also provides refine microstructure and improves the mechanical and physical properties of products with environmental friendliness. This paper reviews 15 years backward, 32 references associated with the state of art of FSW of AMCs materials. Review topics include tool material selections, tool geometry, tool wear and parameters affected the weld quality. This paper provides the guidelines for improving the limitation of severe tool wear rate due to the presence of reinforcement materials in aluminum matrices which affect the weld quality and production costs. The development knowledge can also be applied to the rail transit systems which are the need issues of the country.

**Keywords :** Aluminum matrix composite, Friction stir welding, Tool wear

---

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

<sup>\*</sup> Corresponding author, E-mail: jariyaporn.s@ubu.ac.th Received 18 December 2015, Accepted 19 September 2016

**1. บทนำ**

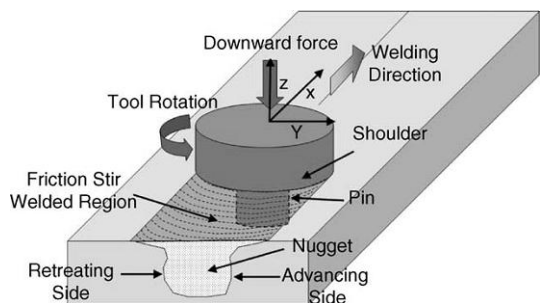
ปัจจุบันอลูมิเนียมเชิงประกอบ (Aluminum Matrix Composites) ถูกนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมอากาศยาน เนื่องจากมีสมบัติความแข็งแรงจำเพาะสูง ทนทานต่อการสึกหรอและทนต่อความร้อนสูง [1] ทำให้น้ำหนักชิ้นส่วนรวมลดลงโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกล ส่งผลให้เกิดการประหยัดเชื้อเพลิงในการขนส่ง อลูมิเนียมและอลูมิเนียมอัลลอยด์สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการเชื่อมทั้งแบบหลอมละลาย (Fusion welding) และการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid State Welding) แต่สำหรับการขึ้นรูปอลูมิเนียมเชิงประกอบมีข้อจำกัดของการเชื่อมแบบหลอมละลายเนื่องจากต้องอาศัยทักษะของช่างเชื่อมเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอลูมิเนียมเนื้อพื้น (Matrix) กับสารเสริมแรง (Reinforcement) ที่ทำให้เกิดตำหนิรูพรุนในรอยเชื่อม และเกิดการก่อตัวเฟสที่ไม่พึงประสงค์ เช่น  $Al_4C_3$  ในการเชื่อมวัสดุ AA2124/SiCp [2] ดังนั้นการเชื่อมในสภาวะของแข็งจึงเป็นเทคนิคที่มีการวิจัยพัฒนาสำหรับการเชื่อมอลูมิเนียมเชิงประกอบ เช่น การเปลี่ยนกระบวนการเชื่อมถึงเชื้อเพลิงของบริษัท โบอิง ผู้ผลิตอากาศยานประเทศสหรัฐอเมริกา จากการเชื่อมแบบอาร์กทั้งสแตงก้าชดุมเป็นกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding) ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการเชื่อมได้ 99% และไม่เกิดตำหนิในรอยเชื่อม [3] เป็นต้น

เนื่องจากแนวโน้มสัดส่วนการใช้งานอลูมิเนียมเชิงประกอบสูงขึ้นจากการเติบโตของอุตสาหกรรมอากาศยานและระบบขนส่งแบบราง ดังนั้นการศึกษาร่วม

วัสดุอลูมิเนียมเชิงประกอบด้วยการเชื่อมในสภาวะของแข็ง จึงมีความสำคัญ และกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งที่นิยมใช้คือ กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังนั้นบทความนี้จึงได้ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุอลูมิเนียมเชิงประกอบ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนากระบวนการให้มีประสิทธิภาพ มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในอุตสาหกรรมต่อไป

**2. หลักการเชื่อมเสียดทานแบบกวน**

หลักการของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน คือ เครื่องมือที่ประกอบด้วย หัวพิน (Pin) และบ่าเครื่องมือ (Shoulder) ทำหน้าที่ให้ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือและชิ้นงาน เป็นความร้อนที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของชิ้นงาน และกวนเนื้อวัสดุให้เกิดการไหลตัวเคลื่อนที่รอบหัวพินภายใต้บ่าของเครื่องมือเชื่อม ความร้อนทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ไหลวนรอบเครื่องมือเชื่อม และเมื่อเครื่องมือเคลื่อนที่ บ่าด้านหลังของเครื่องมือเชื่อมจะกดอัด และผสมวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นแนวเชื่อม [2, 4] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 หลักการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [2]

ข้อดีของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนคือ มีสมบัติโครงสร้างรอยเชื่อมที่ดี มีเกรนละเอียด ไม่เกิดเกิดปฏิกิริยาทางเคมี เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพราะไม่ต้องใช้ก๊าซปกคลุม และใช้พลังงานต่ำ [2]

### 3. ปัจจัยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุอลูมิเนียมเชิงประกอบ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุอลูมิเนียมเชิงประกอบมีปัจจัยในการพิจารณาเลือกให้เหมาะสมและสัมพันธ์กันดังนี้

#### 3.1 อลูมิเนียมเชิงประกอบ

อลูมิเนียมเชิงประกอบ ประกอบด้วยอลูมิเนียมผสมที่เป็นวัสดุเนื้อพื้น และมีอนุภาคขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อพื้นเรียกว่า สารเสริมแรง อลูมิเนียมผสมเนื้อพื้นแบ่งตามสมาคมอลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกา เช่น กลุ่ม 2xxx (อลูมิเนียม-ทองแดงผสม) และกลุ่ม 7xxx (อลูมิเนียม-สังกะสีผสม) ถูกนำมาผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างภายในเครื่องบินเพราะมีความแข็งแรงสูง กลุ่ม 5xxx (อลูมิเนียม-แมกนีเซียมผสม) และกลุ่ม 6xxx (อลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอนผสม) ถูกนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์เพราะมีความต้านทานการสึกหรอสูง [5] อลูมิเนียมหล่อผสมอัลลอยด์ (Casting Alloys) เช่น กลุ่ม 3xx.x (อลูมิเนียม-ซิลิกอน + ทองแดง และ/หรือ แมกนีเซียมผสม) ถูกใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น [5] จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ากลุ่ม 2xxx, 6xxx, 7xxx และ 3xx.x นิยมนำมาขึ้นรูปด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ส่วนอนุภาคสารเสริมแรงสำหรับอลูมิเนียมเชิงประกอบส่วนใหญ่เป็นวัสดุกลุ่มเซรามิกส์ ในรูปของ ออกไซด์ คาร์ไบด์ หรือ โบไรด์ เช่น SiC,

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiC, TiB<sub>2</sub> และ B<sub>4</sub>C ซึ่ง SiC และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นอนุภาคที่นิยมมาเสริมแรงมากที่สุด [7-32] ด้วยเหตุผลที่หาง่ายและราคาถูก ทนต่อการสึกหรอและต้านทานการเกิดออกซิเดชัน [1] วัสดุเชิงประกอบเหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น ระบบเบรกในรถยนต์ และรถไฟ ระบบเกียร์ เฟลา และวาล์ว เป็นต้น ชิ้นส่วนอากาศยาน เช่น กังหันเครื่องยนต์จรวด กิริบ์ท็อก และถังน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องบินทหาร แขนหมุนใบพัดเฮลิคอปเตอร์ เป็นต้น [6]

#### 3.2 เครื่องมือเชื่อม

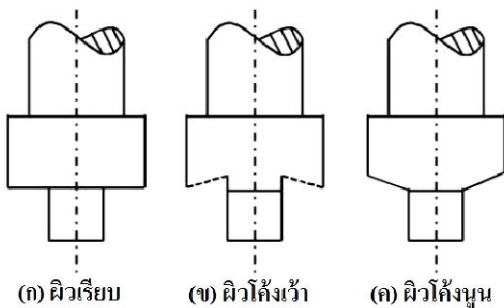
##### 3.2.1 วัสดุเครื่องมือ

วัสดุเครื่องมือควรมีสมบัติความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง มีความต้านทานการคืบ มีความต้านทานต่อความล้า ไม่เกิดปฏิกิริยาที่เป็นอันตรายต่อวัสดุชิ้นงาน ทนต่อแรงกระแทกและการเสียดสี มีค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ ง่ายต่อการตัดเฉือนขึ้นรูป และที่สำคัญคือมีต้นทุนที่เหมาะสม [4] จากการศึกษาพบว่า เหล็กกล้าเครื่องมือเกรด O1 เป็นเหล็กกล้าผสมสูงทนแรงกระแทกมีระดับการใช้งานสูงสุด ร้อยละ 16 รองลงมาคือ เหล็กกล้าคาร์บอนสูง-โครเมียมสูง (HCHCr) และ โลหะผิวเคลือบทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ (WC-Co) ร้อยละ 13 และอื่นๆ ร้อยละ 71 ตามลำดับ [7-38]

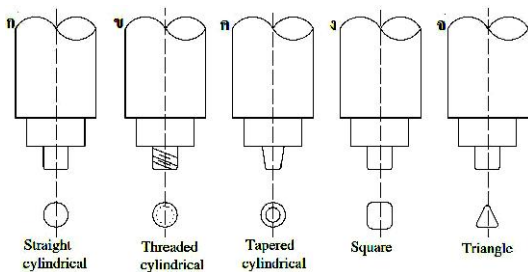
##### 3.2.2 รูปทรงเครื่องมือ

เครื่องมือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน บ่าเครื่องมือมีอิทธิพลต่อการสร้างความร้อนในการเชื่อมกวน และหัวพินมีบทบาทต่อการไหลของเนื้อวัสดุขณะอ่อนตัวและความสม่ำเสมอของรอยเชื่อม [4, 33] รูปทรงบ่าเครื่องมือที่นิยมออกแบบ

ได้แก่ (ก) ผิวเรียบ (ข) ผิวโค้งเว้า (ค) ผิวโค้งนูน ดังรูปที่ 2 [4] ส่วนรูปทรงของหัวพินที่นิยมออกแบบ ได้แก่ (ก) รูปทรงกระบอกตรง (ข) รูปทรงกระบอกเกลียว (ค) รูปทรงกระบอกเรียว (ง) รูปทรงสี่เหลี่ยม และ (จ) รูปทรงสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 3 [39] โดยรูปทรงเครื่องมือแต่ละรูปแบบให้สมบัติทางกลที่แตกต่างกันเนื่องจากการไหลกวนของเนื้อวัสดุที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2 รูปทรงบ่าเครื่องมือ [4]



รูปที่ 3 รูปทรงหัวพิน [39]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการเชื่อมอลูมิเนียมเชิงประกอบ พบว่า รูปทรงที่นำมาออกแบบหัวพินมากที่สุดคือ ทรงกระบอกเกลียว คิดเป็นร้อยละ 41 เนื่องจากส่งผลให้เนื้อวัสดุไหลกวนดี เกิดการกระจาย

ตัวของสารเสริมแรงที่สม่ำเสมอ และรอยเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ได้สมบัติทางกลที่ดี สามารถนำไปใช้เชื่อมกับวัสดุอลูมิเนียมเนื้อพื้นหลายชนิดที่ใช้อนุภาคสารเสริมแรง SiC และ  $Al_2O_3$  รองลงมาคือรูปทรงกระบอกตรง ร้อยละ 19 และรูปทรงสี่เหลี่ยม ร้อยละ 13 และอื่นๆ ร้อยละ 27 ตามลำดับ [7-38]

การออกแบบรูปทรงเครื่องมือสามารถใช้ในการออกแบบการทดลอง [40] และใช้แต่ละรูปทรงเครื่องมือในสถานะการเชื่อมจริง แล้วทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยกระบวนการทางสถิติเพื่อหารูปทรงเครื่องมือที่เหมาะสม วิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัดของการสิ้นเปลืองวัสดุและเวลาดำเนินการ จึงมีการประยุกต์ใช้ควบคู่กับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่นระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) วิเคราะห์รูปทรงเครื่องมือที่เหมาะสม [41] ทำให้ลดเวลาและทรัพยากรในการออกแบบ

### 3.3 พารามิเตอร์การเชื่อม

พารามิเตอร์การเชื่อมประกอบด้วยความเร็วรอบเครื่องมือ (Rotational speed) และความเร็วเดินเชื่อม (Welding speed) พารามิเตอร์ที่เหมาะสมส่งผลให้คุณภาพงานเชื่อมที่ดี จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าความเร็วรอบเครื่องมือมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงชิ้นงานมากที่สุดคิดเป็น 43.70% และอัตราความเร็วเดินเชื่อมคิดเป็น 33.79% ตามลำดับ [42]

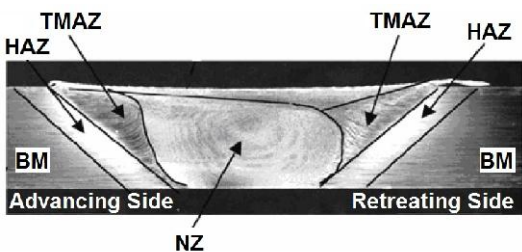
การเชื่อมเสียดทานแบบกวนสำหรับอลูมิเนียมเชิงประกอบ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าค่าความเร็วรอบเครื่องมือที่เหมาะสมในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอยู่ระหว่าง 250 – 2,000 รอบต่อนาที ส่วนความเร็ว

เดินเชื่อมจะอยู่ระหว่าง 11 – 600 มม. ต่อหน้าที่ พบว่า ความเร็วรอบเครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อมอลูมิเนียมเชิง ประกอบมากที่สุดคือ 1,000 รอบต่อนาที รองลงมาคือ 1,200 2,000 800 600 รอบต่อนาที และอื่นๆ และ ความเร็วเดินเชื่อมที่ใช้มากที่สุดคือ 50 มม. ต่อนาที รองลงมาคือ 540 300 40 30 20 มม. ต่อนาที และอื่นๆ ตามลำดับ [7-38]

การศึกษาหาพารามิเตอร์การเชื่อมที่เหมาะสมสามารถใช้วิธีการเดียวกันกับการหารูปทรงเครื่องมือที่เหมาะสม ได้แก่ วิธีการออกแบบการทดลอง [42-43] และวิธีสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ช่วยในการวิเคราะห์ [44]

**4. โครงสร้างรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน**

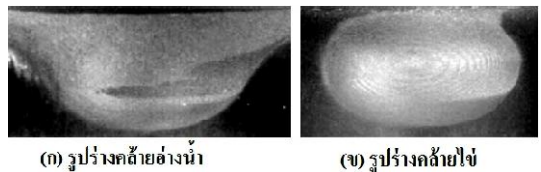
การศึกษาโครงสร้างรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน เพื่อตรวจสอบคุณภาพรอยเชื่อมจากลักษณะของเนื้อวัสดุที่ถูกกวน ข้อบกพร่องของรอยเชื่อม และเพื่อใช้วิเคราะห์หาสาเหตุ และความสัมพันธ์ต่อสมบัติทางกล [18, 27, 37] ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ลักษณะตัดขวางของโครงสร้างรอยเชื่อมดังรูปที่ 4 แบ่งโครงสร้างรอยเชื่อมออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้



รูปที่ 4 โครงสร้างรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน [45]

**4.1 พื้นที่ถูกรกวน (Nugget Zone : NZ)**

พื้นที่ถูกรกวนเป็นบริเวณที่มีการเสียรูปแบบถาวร เนื่องจากการเดินหมุนกวนของเครื่องมือตามแนวเชื่อม ทำให้เนื้อวัสดุส่วนนี้มีการเคลื่อนที่ เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) ขนาดเกรนละเอียดกว่าเกรนวัสดุเดิม (Base Material, BM) รูปร่างของ NZ มี 2 รูปร่างแตกต่างกันได้แก่ รูปร่างคล้ายอ่างน้ำ (Basin) และรูปร่างคล้ายไข่ (Elliptical) [2] ดังรูปที่ 5 จากการทบทวนวรรณกรรม พบรูปร่างคล้ายอ่างน้ำมากที่สุด [19-28, 33-38] โดยมีความสัมพันธ์กับรูปทรงเครื่องมือและพารามิเตอร์ในการเชื่อม [46] ข้อบกพร่องของรอยเชื่อมบริเวณ NZ พบในรูปร่างทั้งสองแบบ เกิดจากความร้อนการไหลกวนเนื้อวัสดุไม่เพียงพอ ส่งผลต่อข้อบกพร่องในรอยเชื่อม [47]



รูปที่ 5 รูปร่างของ NZ [2]

**4.2 พื้นที่ถูกรกระทบทางความร้อนเชิงกล (Thermo-mechanically affected zone : TMAZ)**

พื้นที่ถูกรกระทบทางความร้อนเชิงกล เป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างเนื้อวัสดุเดิมกับ NZ ทั้งสองฝั่ง TMAZ ได้รับอิทธิพลทางความร้อนจากการถ่ายเทความร้อนจาก NZ แต่ไม่เกิดโครงสร้างการเกิดผลึกใหม่เนื่องจากการเสียรูปจากความเครียด (Deformation strain) ไม่เพียงพอ [2]

**4.3 พื้นที่ถูกรกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ)**

พื้นที่ถูกรกระทบทางความร้อน เป็นบริเวณที่อยู่ถัดออกมาจากบริเวณ TMAZ โดยบริเวณนี้ได้รับอิทธิพลจากทางความร้อนแต่เพียงอย่างเดียว ขนาดของพื้นที่ HAZ จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากพารามิเตอร์การเชื่อม การเพิ่มขนาด HAZ จะนำไปสู่ความเสียหายของชิ้นงาน [48] เพราะเป็นบริเวณที่มีความแข็งต่ำสุดเนื่องจากการตกตะกอนหยابและการลดลงของความหนาแน่นดิสโลเคชัน ส่งผลให้เกิดการแตกหักจากการทดสอบแรงดึงบริเวณนี้ทั้งสองฝั่งแบบคู่ [20]

ดังนั้นการเชื่อมอลูมิเนียมเชิงประกอบ โครงสร้างจุลภาคที่ดีควรมีลักษณะรูปร่าง NZ รูปแบบใดก็ได้ที่มีรอยเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกันที่สมบูรณ์ปราศจากข้อบกพร่อง และพื้นที่ HAZ มีช่วงแคบ ลดโอกาสการแตกร้าวของชิ้นงาน ส่งผลต่อสมบัติทางกลที่ดี

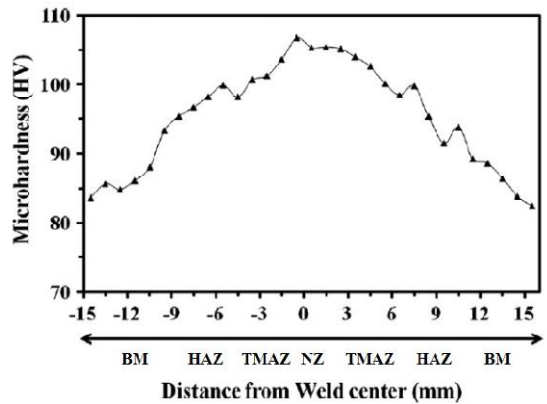
**5. สมบัติทางกลของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน**

การทดสอบสมบัติทางกลของรอยเชื่อม แสดงถึงประสิทธิภาพการเชื่อมเสียดทานแบบกวน สมบัติทางกลที่นิยมนักศึกษามีดังนี้

**5.1 ความแข็ง**

การวัดค่าความแข็งตามหน้าตัดขวางของรอยเชื่อมเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของโครงสร้างรอยเชื่อมต่อความแข็งในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน พบว่าค่าความแข็งสูงสุดเกิดขึ้นตรงกลางของ NZ จากนั้นความแข็งค่อยๆลดลงจาก TMAZ และ HAZ จนถึง BM ดังรูปที่ 6 เนื่องจากเกิดความเค้นอัดจากเครื่องมือกวนบริเวณเชื่อม

การกระจายตัวของอนุภาคสารเสริมแรงที่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันกับวัสดุเนื้อพื้น มีขนาดเกรนที่ละเอียด และการเกิดความหนาแน่นดิสโลเคชันรอบๆพื้นที่กวน [25, 34, 37, 49]



**รูปที่ 6** ความแข็งในรอยเชื่อมตัดขวาง ชิ้นงานเชื่อม AA6061/B<sub>4</sub>Cp [49]

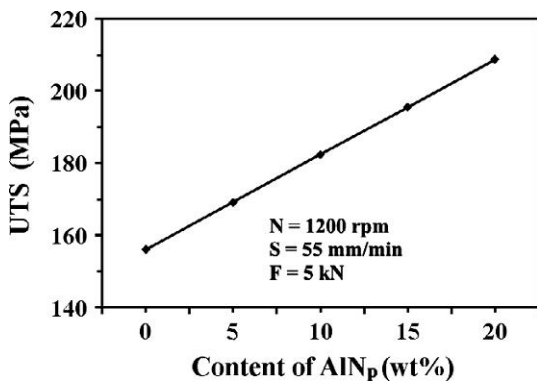
**5.2 ความต้านทานแรงดึง**

ความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อมใช้เปรียบเทียบกับ ความต้านทานวัสดุเนื้อพื้น เพื่อประเมินประสิทธิภาพของรอยเชื่อม พบปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงรอยเชื่อม ดังนี้

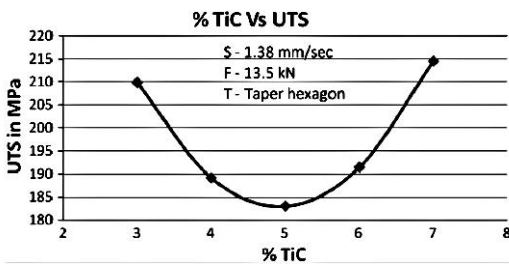
**5.2.1 อิทธิพลจากปริมาณสารเสริมแรง**

ปริมาณของสารเสริมแรงของวัสดุชิ้นงานส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (UTS) ของรอยเชื่อมใน 2 รูปแบบ คือรูปแบบที่หนึ่ง ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของสารเสริมแรง ลักษณะเชิงเส้นตรง เช่น ในการเชื่อมวัสดุ AA6061/AlNp และ AA6061/B<sub>4</sub>Cp ดังรูปที่ 7 เนื่องจากปริมาณสารเสริมแรงช่วยเพิ่มความหนาแน่นของ

คิสโลเคชั่นรอบอนุภาคสารเสริมแรงในระหว่างการผลิต [35-36] และรูปแบบที่สอง ลักษณะเส้นโค้งพาราโบลาหงาย เช่น ในการเชื่อมวัสดุ AA6061/TiCp ดังรูปที่ 8 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารเสริมแรงช่วงแรกเกิดการไม่ยึดเกาะกันของอนุภาคสารเสริมแรงที่พื้นผิว นำไปสู่การลดลงของค่าความแข็งแรงได้ แต่หลังจากปริมาณสารเสริมแรงเพิ่มมาถึงปริมาณหนึ่งพบว่าค่าความแข็งแรงกลับมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แนวโน้มนี้อาจเกิดจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคสารเสริมแรงทำให้มีความต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวรมากขึ้นจึงช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึง [33]



รูปที่ 7 อิทธิพลของปริมาณสารเสริมแรงต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ชิ้นงานเชื่อม AA6061/AlNp [36]



รูปที่ 8 อิทธิพลของปริมาณสารเสริมแรงต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ชิ้นงานเชื่อม AA6061/TiCp [33]

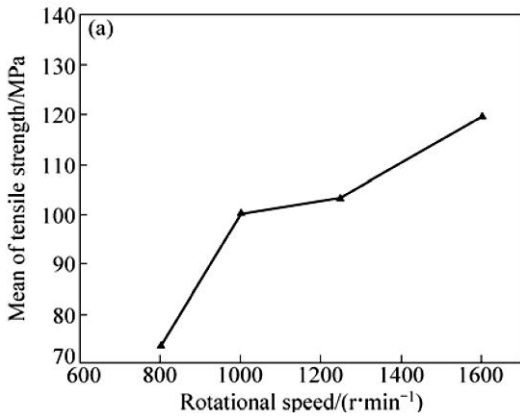
### 5.2.2 อิทธิพลจากรูปทรงเครื่องมือ

อัตราส่วน (D/d) ขนาดของบ่าเครื่องมือ (D) และขนาดของหัวพิน (d) เท่ากับ 3 : 1 จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดดีที่สุด เนื่องจากเป็นสัดส่วนที่สร้างความร้อนจากการเสียดทานที่เหมาะสมในการไหลวัสดุในการเชื่อมกวนให้รอยเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่เกิดตำหนิในชิ้นงาน [23] ส่วนรูปทรงหัวพินที่แตกต่างกันส่งผลต่อความต้านทานแรงดึงเช่นกัน เช่น การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุ AA6061/TiCp เมื่อใช้หัวพินรูปทรงสี่เหลี่ยมรีจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดสูงกว่ารูปแบบอื่น [33] ขณะที่การเชื่อมวัสดุเชิงประกอบ Al-10 %TiB<sub>2</sub> ด้วยหัวพินทรงสี่เหลี่ยมให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่ารูปแบบอื่นในเงื่อนไขเดียวกัน [38]

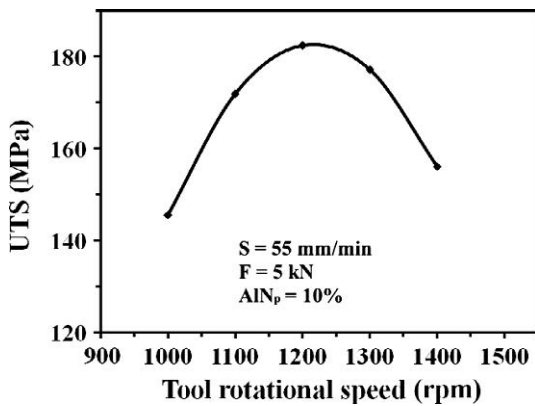
### 5.2.3 อิทธิพลจากพารามิเตอร์การเชื่อม

ปัจจัยความเร็วรอบเครื่องมือ ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของรอยเชื่อม คือ ความเร็วรอบเครื่องมือเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานเพิ่มขึ้น เช่น ในการเชื่อมวัสดุ AA6061/SiCp [42] ดังรูปที่ 9 เนื่องจากการใช้ความเร็วรอบต่ำจะเกิดความเครียดของวัสดุในการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรน้อย เนื่องจากเกิดความร้อนไม่เพียงพอ ส่งผลให้เกิดตำหนิในรอยเชื่อม เมื่อเพิ่มความเร็วรอบที่เหมาะสมจะสร้างความร้อนเพียงพอในการกวนทำให้เกิดเกรนละเอียดและการกระจายตัวของอนุภาคเสริมแรงที่ดี ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึงรอยเชื่อมที่สูงขึ้น แต่ถ้าความเร็วรอบเครื่องมือที่สูงเกินไปจะสร้างความร้อนที่สูงเกินไปทำให้เกิดการไหลกวนที่ปั่นป่วนของวัสดุบริเวณการเชื่อมสูง นำไปสู่ความต้านทานแรงดึงรอยเชื่อมที่ต่ำลง มีลักษณะเส้นโค้งพาราโบลาคว่ำ เช่น ในการเชื่อมวัสดุ AA6061/AlNp และ AA6061/B<sub>4</sub>Cp [35-36] ดังรูปที่ 10





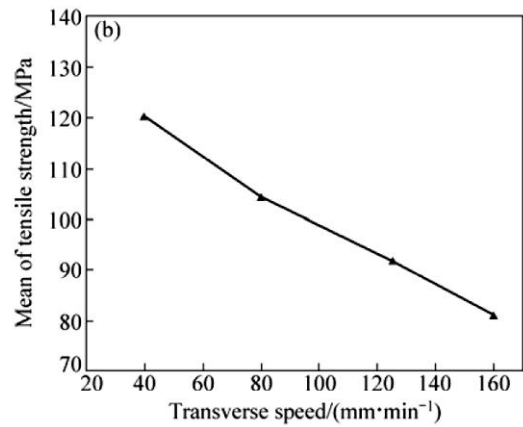
รูปที่ 9 อิทธิพลของความเร็วรอบต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ชิ้นงานเชื่อม AA6061/SiCp [42]



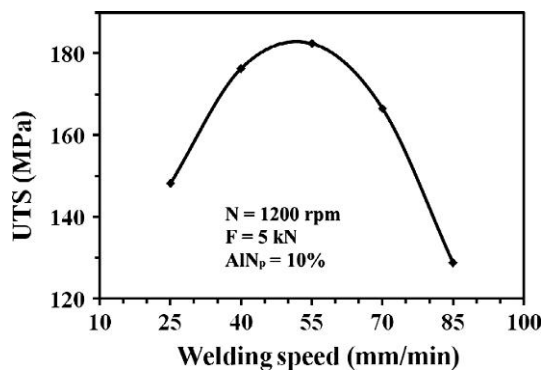
รูปที่ 10 อิทธิพลของของความเร็วรอบต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ชิ้นงานเชื่อม AA6061/AlNp [36]

ปัจจัยความเร็วเดินเชื่อมส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง คือเมื่อลดความเร็วเดินเชื่อมลงทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานสูงขึ้น เช่น ในการเชื่อมวัสดุ AA6061/TiCp และ AA6061/SiCp [33, 42] ดังรูปที่ 11 เนื่องจากความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำลงจะเกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานที่สูงขึ้นจึงช่วยเพิ่มการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุและการก่อตัวของรอยเชื่อมที่มี

ประสิทธิภาพ แต่ถ้าความเร็วเดินเชื่อมลดลงต่ำเกินไป จะเกิดความร้อนที่สูงเกินไปและอัตราการระบายความร้อนลดลงมาก เกิดการไหลบ้นป่วนของโลหะหลอมนำไปสู่ตำหนิในรอยเชื่อมทำให้สมบัติทางกลต่ำ จนเกิดลักษณะความล้มพันธ์เส้นโค้งพาราโบลาคว่ำ เช่น ในการเชื่อมวัสดุ AA6061/AlNp และ AA6061/B<sub>4</sub>Cp [35-36] ดังรูปที่ 12

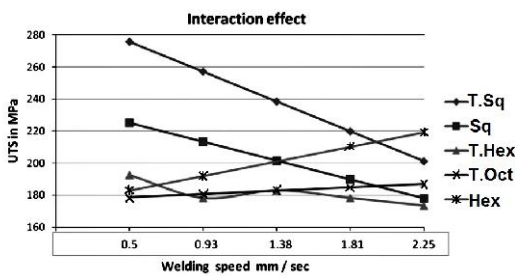


รูปที่ 11 อิทธิพลของความเร็วเดินเชื่อม ต่อค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย ชิ้นงานเชื่อม AA6061/SiCp [42]



รูปที่ 12 อิทธิพลของความเร็วเดินเชื่อมต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ชิ้นงานเชื่อม AA6061/AlNp [36]

ปัจจัยร่วมระหว่างรูปทรงเครื่องมือและความเร็วเดินเชื่อม พบว่า การใช้หัวพินรูปทรงหกเหลี่ยมจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดสูงขึ้นเมื่อความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้น ส่วนรูปทรงหัวพินทรงสี่เหลี่ยมเรียวยให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่ารูปแบบอื่นๆ ที่ความเร็วเดินเชื่อมต่ำ แต่ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดจะลดลงเมื่อความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นในการเชื่อมวัสดุ AA6061/TiCp [33] ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของรูปทรงหัวพินกับความเร็วเดินเชื่อม ชิ้นงานเชื่อม AA6061/TiCp [33]

ดังนั้น เพื่อให้สมบัติทางกลของรอยเชื่อมที่ดี จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยการเชื่อมตั้งที่กล่าวมาอย่างพร้อมกัน เช่น การใช้ขนาดสัดส่วนขนาดของบ่าเครื่องมือต่อหัวพิน (D/d) เท่ากับ 3: 1 เป็นพื้นฐานการออกแบบเครื่องมือ การเลือกรูปทรงเครื่องมือ และพารามิเตอร์การเชื่อมให้เหมาะสมกับวัสดุชิ้นงาน โดยใช้การออกแบบการทดลอง หรือการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการตัดสินใจ

## 6. การสึกกร่อนของเครื่องมือ

การสึกกร่อนของเครื่องมือในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียมเชิงประกอบเป็นข้อจำกัดที่สำคัญที่ส่งผล

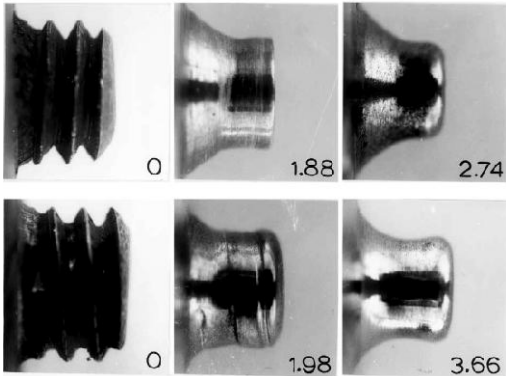
ต่อคุณภาพรอยเชื่อม เพราะเครื่องมือเกิดการเสียรูปและการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวพิน อัตราการสึกกร่อนของหัวพินถูกกำหนดจากกลไกหลักของการสึกกร่อน เช่น การสึกกร่อนแบบขูดขีด (Abrasive wear) [41] ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสึกกร่อนของเครื่องมือประกอบด้วย

### 6.1 อิทธิพลจากปริมาณสารเสริมแรง

จากการศึกษาการเชื่อมชิ้นงาน A359 ที่ปริมาณ 20%SiCp และ 30%SiCp พบว่าอัตราการสึกกร่อนแปรผันตรงกับปริมาณของสารเสริมแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณสารเสริมแรงที่เพิ่มขึ้นทำให้วัสดุชิ้นงานมีความแข็งแรงสูงขึ้น และต้านทานการเสียดสีได้ดีขึ้น [7]

### 6.2 อิทธิพลจากเครื่องมือเชื่อม

รูปทรงเครื่องมือและวัสดุเครื่องมือมีอิทธิพลต่อการสึกกร่อน พบการสึกกร่อนของหัวพินรูปทรงกระบอกเกลียว เช่น การเชื่อมวัสดุ 6061/20%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p ในช่วงเริ่มต้นกระบวนการเชื่อมมีอัตราการสึกกร่อนของหัวพินสูง และเริ่มลดลงจนอัตราการสึกกร่อนคงที่ เปลี่ยนจากรูปทรงเกลียวกลายเป็นผิวทรงกระบอก ดังรูปที่ 14 เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “self-optimized shape” การสึกกร่อนที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการขัดสีกันระหว่างผิวของหัวพินกับอนุภาคสารเสริมแรงเป็นหลัก [30] สอดคล้องกับการศึกษาการเชื่อมอลูมิเนียมเชิงประกอบ A359/20%SiCp พบว่าเมื่อหัวพินสึกกร่อนมีรูปทรง “self-optimized shape” ทำให้การไหลกวนของเนื้อโลหะดีขึ้นรอยเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกัน และไม่มีการสึกกร่อนของหัวพินเพิ่มเติม [22] ส่วนเครื่องมือรูปทรงอื่นๆ ไม่พบการศึกษาการสึกกร่อน

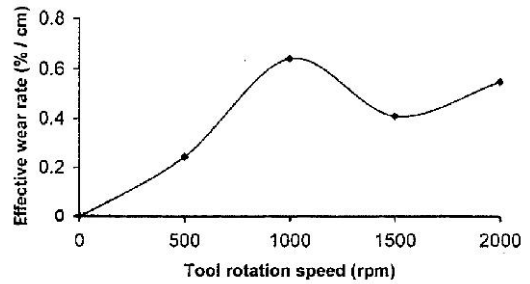


รูปที่ 14 กลไกการสึกหรอของหัวพินรูปทรงเกลียว [30]

วัสดุของหัวพินมีความต้านทานการสึกหรอได้ดี ต้องมีสมบัติต้านทานการเสียดสี มีความแข็งแรงสูงกว่า วัสดุชิ้นงานเชื่อม จากการศึกษาค่าการเชื่อมวัสดุ A359/20%SiCp ที่เงื่อนไขเดียวกัน พบว่าเพชรเป็นเครื่องมือที่มีอัตราการสึกหรอน้อยสุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น เนื่องจากเพชรมีต้นทุนวัสดุและต้นทุนการขึ้นรูปสูง จึงไม่เหมาะกับการนำมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม เหล็กกล้าเครื่องมือเป็นวัสดุทางเลือก แม้ว่าจะมีการสึกหรอที่สูงกว่าแต่มีต้นทุนวัสดุต่ำและขึ้นรูปง่ายด้วยกรรมวิธีพื้นฐาน [7]

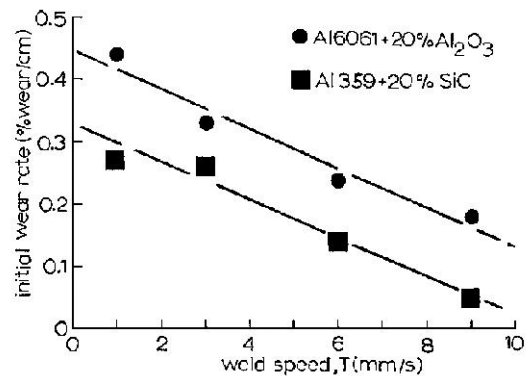
6.3 อิทธิพลจากพารามิเตอร์การเชื่อม

รายงานการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเร็วยรอบเครื่องมือส่งผลให้อัตราการสึกหรอของเครื่องมือสูงขึ้น มีความสัมพันธ์รูปแบบไม่เชิงเส้นตรง เช่น การเชื่อมวัสดุ AA6061/20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p [26] ดังรูปที่ 15 อัตราการสึกหรอสูงสุดที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที แล้วเริ่มลดลง อาจเป็นผลมาจากการเกิดพฤติกรรมเหมือนของเหลว (fluid-like behavior) และการไหลปั่นป่วนของอนุภาคเพิ่มขึ้น



รูปที่ 15 อิทธิพลของความเร็วรอบต่ออัตราการสึกหรอหัวพิน ชิ้นงานเชื่อม AA6061/20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p [26]

ส่วนการเพิ่มความเร็วยรอบเชื่อมส่งผลให้อัตราการสึกหรอของหัวพินลดลงแบบแปรผกผันเชิงเส้นตรง เช่น ในการเชื่อมวัสดุ AA6061/20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p และ A359/20% SiCp [14, 30] ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 อิทธิพลของความเร็วเชื่อมต่ออัตราการสึกหรอหัวพิน ชิ้นงานเชื่อม A359/20% SiCp [14]

ดังนั้นปัจจัยของการสึกหรอของเครื่องมือควรพิจารณาควบคู่กับสมบัติทางกลของรอยเชื่อม เพราะการสึกหรอของเครื่องมือส่งผลต่อสมบัติทางกลลดลง

ดังนั้นจำเป็นต้องใช้ข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมา เป็นพื้นฐาน ในการเลือกปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสมเพื่อการลดการ สึกหรอของเครื่องมือและได้สมบัติทางกลรอยเชื่อมที่ เหมาะสมเช่นกัน

**7. สรุปผล**

บทความวิชาการนี้แสดงถึงความสำคัญของการ เชื่อมเสียดทานแบบกวน และการพิจารณาปัจจัยในการ เชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุอลูมิเนียมเชิงประกอบ เพื่อนำเป็นข้อมูลไปประยุกต์ใช้ในการเชื่อมทาง อุตสาหกรรม สามารถสรุปด้วยประเด็นดังต่อไปนี้

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นวิธีการที่เหมาะสม สำหรับการเชื่อมอลูมิเนียมเชิงประกอบ จึงต้อง ทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ งานในอุตสาหกรรม

การกำหนดปัจจัยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน สำหรับวัสดุอลูมิเนียมเชิงประกอบควรต้องพิจารณาทั้ง คุณภาพของแนวเชื่อมและความคุ้มค่าของกระบวนการ เชื่อมซึ่งรวมถึงต้นทุนของเครื่องมือ บนพื้นฐานความ คุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

วิธีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการเชื่อม ทำได้ ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองและการจำลองแบบ และควรดำเนินการควบคู่กันเพื่อลดการสิ้นเปลืองเวลา และทรัพยากร

การสึกหรอของเครื่องมือเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการ พิจารณาคุณภาพรอยเชื่อม แต่การศึกษากการสึกหรอของ เครื่องมือยังมีอยู่อย่างจำกัด ควรมีการศึกษาอย่าง ต่อเนื่องเพื่อประโยชน์ในการพัฒนาทางด้าน อุตสาหกรรม

**8. เอกสารอ้างอิง**

[1] A.R. Kheder, G.S. Marahleh and D.M. Al-Jamea, "Strengthening of Aluminum by SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and MgO", Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering 5(6), 2011, pp. 533-541.

[2] R.S. Mishra and Z.Y. Ma, "Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering R 50(1-2), 2005, pp. 1-78.

[3] D. Rowe and T. Wayne, "Advances in tooling materials for friction stir welding", Proceedings of the Materials Congress, TWI and Cedar Metals Ltd., London, 2006, pp. 1-11.

[4] Y.N. Zhang, X. Cao, S. Larose and P. Wanjara, "Review of tools for friction stir welding and processing", Canadian Metallurgical Quarterly 51(3), 2012, pp. 250-261.

[5] The Aluminum Association, Inc., "SELECTION and APPLICATIONS", Available: <http://www.calm-aluminium.com.au/documents/aluminium-alloys.pdf>, 25 September 2015.

[6] M.K. Surappa, "Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities", Sadhana 28(1-2), 2003, pp. 319-334.

[7] T. Prater, A. Strauss, G. Cook, B. Gibso and C. Cox, "A Comparative Evaluation of the Wear Resistance of Various Tool Materials in Friction Stir Welding of Metal Matrix Composites", Materials Engineering and Performance 22(6), 2013, pp. 1807-1813.

- [8] H. Liu, Y. Hu, Y. Zhao and H. Fujii, "Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AC4A + 30 vol.%SiCp composite", *Materials & Design* 65, 2015, pp. 395–400.
- [9] C. Devanathan and A.S. Babu, "Friction Stir Welding of Metal Matrix Composite Using Coated Tool", *Procedia Materials Science* 6, 2014, pp. 1470–1475.
- [10] H. Uzun, "Friction stir welding of SiC particulate reinforced AA2124 aluminium alloy matrix composite", *Materials and Design* 28, 2007, pp. 1440–1446.
- [11] F. Cioffi, R. Fernández, D. Gesto, P. Rey, D. Verdera and G. González-Doncel, "Friction stir welding of thick plates of aluminum alloy matrix composite with a high volume fraction of ceramic reinforcement", *Composites: Part A* 54, 2013, pp. 117–123.
- [12] Z.Y. Ma, A.H. Feng, B.L. Xiao, J.Z. Fan and L.K. Shi, "Microstructural Evolution and Performance of Friction Stir Welded Aluminum Matrix Composites Reinforced by SiC Particles", *Materials Science Forum* 539-543, 2007, pp. 3814-3819.
- [13] M. Bahrami, M.K.B. Givi, K. Dehghani and N. Parvin, "On the role of pin geometry in microstructure and mechanical properties of AA7075/SiC nano-composite fabricated by friction stir welding technique", *Materials and Design* 53, 2014, pp. 519–527.
- [14] D.J. Shindo, A.R. Rivera and L.E. Murr, "Shape optimization for tool wear in the friction-stir welding of cast Al359-20% SiC MMC", *Journal of Materials Science* 37(23), 2002, pp. 4999-5005.
- [15] M. Amirizad, A. Kokabi, M. Abbasi Gharacheh, R. Sarrafi, B. Shalchi and M. Azizieh, "Evaluation of microstructure and mechanical properties in friction stir welded A356 + 15%SiCp cast composite", *Materials Letters* 60(4), 2006, pp. 565–568.
- [16] F. Cioffi, J. Ibáñez, R. Fernández and G. González-Doncel, "The effect of lateral off-set on the tensile strength and fracture of dissimilar friction stir welds, 2024Al alloy and 17%SiC/2124Al composite", *Materials & Design* 65, 2015, pp. 438–446.
- [17] H.J. Liu, J.C. Feng, H. Fujii and K. Nogi, "Wear characteristics of a WC–Co tool in friction stir welding of AC4AC 30 vol%SiCp composite", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45, 2005, pp. 1635–1639.
- [18] A.H. Feng, B.L. Xiao and Z.Y. Ma, "Effect of microstructural evolution on mechanical properties of friction stir welded AA2009/SiCp composite", *Composites Science and Technology* 68(9), 2008, pp. 2141–2148.
- [19] D. Wang, B.L. Xiao, Q.Z. Wang and Z.Y. Ma, "Friction stir welding of SiCp/2009Al composite plate", *Materials & Design* 47, 2013, pp. 243–247.

- [20] D.R. Ni, D.L. Chen, D. Wang, B.L. Xiao and Z.Y. Ma, "Influence of microstructural evolution on tensile properties of friction stir welded joint of rolled SiCp/AA2009-T351 sheet", *Materials & Design* 51, 2013, pp. 199–205.
- [21] P. Periyasamy, B. Mohan and V. Balasubramanian, "Effect of Heat Input on Mechanical and Metallurgical Properties of Friction Stir Welded AA6061-10% SiCp MMCs", *Journal of Materials Engineering and Performance* 21(11), 2012, pp. 2417-2428.
- [22] G.J. Fernandez and L.E. Murr, "Characterization of tool wear and weld optimization in the friction-stir welding of cast aluminum 359+20% SiC metal-matrix composite", *Materials Characterization* 52, 2004, pp. 65-75.
- [23] P. Vijayavel, V. Balasubramanian and S. Sundaram, "Effect of shoulder diameter to pin diameter (D/d) ratio on tensile strength and ductility of friction stir processed LM25AA-5% SiCp metal matrix composites", *Materials & Design* 57, 2014, pp. 1-9.
- [24] L.M. Marzoli, A.V. Strombeck, J.F. Dos Santos, C. Gambaro and L.M. Volpone, "Friction stir welding of an AA6061/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/20p reinforced alloy", *Composites Science and Technology* 66, 2006, pp. 363–371.
- [25] G. Minak, L. Ceschini, I. Boromei and M. Ponte, "Fatigue properties of friction stir welded particulate reinforced aluminium matrix composites", *International Journal of Fatigue* 32(1), 2010, pp. 218–226.
- [26] R.A. Prado, L.E. Murr, D.J. Shindo and K.F. Soto, "Tool wear in the friction-stir welding of aluminum alloy 6061+20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: a preliminary study", *Scripta Materialia* 45(1), 2001, pp. 75-80.
- [27] X.G. Chen, M. da Silva, P. Gougeon and L. St-Georges, "Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA6063–B<sub>4</sub>C metal matrix composites", *Materials Science and Engineering: A* 518(1-2), 2009, pp. 174–184.
- [28] F. Khodabakhshi, H. Ghasemi Yazdabadi, A.H. Kokabi and A. Simchi, "Friction stir welding of a P/M Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite: Microstructure and mechanical properties", *Materials Science and Engineering: A*, 585, 2013, pp. 222–232.
- [29] L. Ceschini, I. Boromei, G. Minak, A. Morri and F. Tarterini, "Microstructure, tensile and fatigue properties of AA6061/20 vol.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p friction stir welded joints", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38(4), 2007, pp. 1200–1210.
- [30] R.A. Prado, L.E. Murr, K.F. Soto and J.C. McClure, "Self-optimization in tool wear for friction-stir welding of Al 6061/20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMC", *Materials Science and Engineering: A* 349(1-2), 2003, pp. 156-165.
- [31] M. Shamanian, M. Mohammadnezhad and J. Szpunar, "Texture analysis of a friction stir welded ultrafine grained Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite produced by accumulative roll-bonding", *Journal of Alloys and Compounds* 615, 2014, pp. 651–656.

- [32] L. Ceschini, I. Boromei, G. Minak, A. Morri and F. Tarterini, "Effect of friction stir welding on microstructure, tensile and fatigue properties of the AA7005/10 vol.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p composite", *Composites Science and Technology* 67(3-4), 2007, pp. 605–615.
- [33] S. Gopalakrishnan and N. Murugan, "Prediction of tensile strength of friction stir welded aluminium matrix TiCp particulate reinforced composite", *Materials & Design* 32(1), 2011, pp. 462–467.
- [34] I. Dinaharan and N. Murugan, "Effect of friction stir welding on microstructure mechanical and wear properties of AA6061/ZrB<sub>2</sub> in situ cast composites", *Materials Science and Engineering: A* 543, 2012, pp. 257–266.
- [35] K. Kalaiselvan and N. Murugan, "Role of friction stir welding parameters on tensile strength of AA6061–B<sub>4</sub>C composite joints", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 23(3), 2013, pp. 616–624.
- [36] N. Murugan and B. Ashok Kumar, "Prediction of tensile strength of friction stir welded stir cast AA6061-T6/AlNp composite", *Materials & Design* 51, 2013, pp. 998–1007.
- [37] H. Nami, H. Adgi, M. Sharifitabar and H. Shamabadi, "Microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al/Mg<sub>2</sub>Si metal matrix cast composite", *Materials & Design* 32(2), 2011, pp. 976–983.
- [38] S.J. Vijaya and N. Murugan, "Influence of tool pin profile on the metallurgical and mechanical properties of friction stir welded Al–10 wt.% TiB<sub>2</sub> metal matrix composite", *Materials and Design* 31(7), 2010, pp. 3585–3589.
- [39] K. Elangovan and V. Balasubramanian, "Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy", *Materials and Design* 29, 2008, pp. 362–373.
- [40] C. Blignault, D.G. Hattingh and M.N. James, "Optimizing Friction Stir Welding via Statistical Design of Tool Geometry and Process Parameters", *Journal of Materials Engineering and Performance* 21(6), 2012, pp. 927–935.
- [41] G. Buffa, J. Hua, R. Shivpuri and L. Fratini, "Design of the friction stir welding tool using the continuum based FEM model", *Materials Science and Engineering A* 419, 2006, pp. 381–388.
- [42] M. Salehi, M. Saadatmand and J. Aghazadeh Mohandesi, "Optimization of process parameters for producing AA6061/SiC nanocomposites by friction stir processing", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 22(5), 2012, pp. 1055–1063.
- [43] B.A. Kumar and N. Murugan, "Optimization of friction stir welding process parameters to maximize tensile strength of stir cast AA6061-T6/AlNp composite", *Materials and Design* 57, 2014, pp. 383–393.

- [44] R. Mohan, N.R. Rajesh and S. Kumar, "finite element modeling for maximum temperature in friction stir welding of AA1100 and optimization of process parameter by taguchi method", *International Journal of Research in Engineering and Technology* 3(5), 2014, pp. 728-733.
- [45] A.M. Hassan, M. Almomani, T. Qasim and A. Ghaithan, "Statistical analysis of some mechanical properties of friction stir welded aluminium matrix composite", *International Journal of Experimental Design and Process Optimisation* 3(1), 2012, pp. 91-109.
- [46] D. Wang, B.L. Xiao, D.R. Ni and Z.Y. Ma, "Friction Stir Welding of Discontinuously Reinforced Aluminum Matrix Composites: A Review", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* 27(5), 2014, pp. 816-824.
- [47] O.S. Salih, H. Ou, W. Sun and D.G. McCartney, "A review of friction stir welding of aluminium matrix composites", *Materials and Design* 86, 2015, pp. 61–71.
- [48] T.S. Fountain, "The Efficacy of Friction Stir Welding in High Strength Steel Production", *Research Experience for Undergraduates*, National Science Foundation, South Dakota School of Mines and Technology, United States. 2013.
- [49] K. Kalaiselvan, I. Dinaharan and N. Murugan, "Characterization of friction stir welded boron carbide particulate reinforced AA6061 aluminum alloy stir cast composite", *Materials and Design* 55, 2014, pp. 176–182.