

การเกิดข้อบกพร่องในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน: บทความปริทัศน์

Defects formation in friction stir welding: A review

มูหามัด เต๊ะยอ^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส 96000

รับบทความ 29 มีนาคม 2567

แก้ไขบทความ 21 กันยายน 2567

ตอบรับบทความ 28 กันยายน 2567

บทคัดย่อ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding; FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมในสภาพของแข็งที่นิยมใช้เชื่อมอะลูมิเนียมผสม และแมกนีเซียมผสม ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ได้มีการนำกระบวนการเชื่อมนี้ไปประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมการต่อเรือ การบินและอวกาศ ยานยนต์ ตู้โดยสารรถไฟ ทุ่นยนต์ และอื่นๆ ในบทความนี้ ผู้เขียนมุ่งเน้นไปที่การเกิดข้อบกพร่องต่างๆ ในระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เช่น รูโพรง ครีบกาว การผสานที่ไม่สมบูรณ์ ช่องว่าง รอยแยกหรือร่อง และรอยแตก โดยข้อบกพร่องดังกล่าวจะส่งผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อม และยังส่งผลกระทบต่อสมบัติทางโครงสร้างจุลภาคและทางกลด้วย โดยข้อบกพร่องข้างต้นสามารถขจัดได้ด้วยการปรับตัวแปรเชื่อม และเลือกใช้รูปร่างของตัวกวนให้เหมาะสม นอกจากนี้บทความจะกล่าวถึงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับการเชื่อมวัสดุต่างชนิดด้วย เช่น การเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมผสมกับทองแดง (Al-Cu) และอะลูมิเนียมผสมกับเหล็ก (Al-Steel) อีกด้วย

คำสำคัญ : การเชื่อมเสียดทานแบบกวน; ข้อบกพร่องในแนวเชื่อม; การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุต่างชนิด

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน E-mail : tehyo_m@hotmail.com

การเกิดข้อบกพร่องในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน: บทความปริทัศน์ Defects formation in friction stir welding: A review

Muhamad Tehyo^{1*}

¹Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Mueang District, Narathiwat Province, 96000

Received 29 March 2024

Revised 21 September 2024

Accepted 28 September 2024

Abstract

Friction stir welding (FSW) is an advanced solid state joining process for joining Aluminum alloys, and Magnesium alloys. In the recent years, it is gaining enormous applications in shipbuilding, aerospace, automotive, railway rolling stock, robotics, and others. In this review article, authors are focused on the formation of different defects during friction stir welding. Such as, Tunnel defect, Flash defect, Kissing bond defect, Void/Wormhole defect, Cavity or Groove/Channel like defect, and Cracks and Crack line root defect. The defects were influencing the quality of the weldment and affect the microstructural and mechanical properties. The defects can be overcome by optimizing the process parameters along with suitable tool geometry. In particular, various difficulties and defects observed during dissimilar welding of the Al-Cu and Al-Steel are addressed.

keyword : Friction stir welding; Defects; FSW of dissimilar metals

* Corresponding author E-mail : tehyo_m@hotmail.com

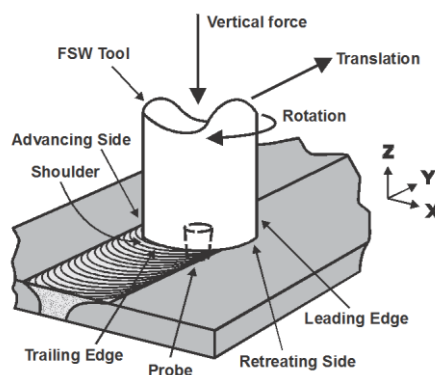
1. บทนำ

ความท้าทายใหม่สำหรับนักวิจัยในปัจจุบัน คือ การคิดค้นและพัฒนากระบวนการในการผลิตที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและในที่จะรวมถึงการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding; FSW) และกระบวนการเสียดทานด้วย (Friction stir processing; FSP) กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นเทคนิคหนึ่งของการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid-state joining technique) กระบวนการเชื่อมนี้ได้ถูกคิดค้นและจดสิทธิบัตรโดยสมาคมการเชื่อมแห่งประเทศไทย (The welding institute; TWI) ในปี 1991 [1] สำหรับใช้เชื่อมแบบต่อชนและแบบต่อเกลยของวัสดุทั้งในกลุ่มโลหะ นอกกลุ่มโลหะ และพลาสติก การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นกระบวนการเชื่อมแบบต่อเนื่อง โดยกระบวนการเริ่มจากการที่ตัวกวนหมุนตามความเร็วที่กำหนดและกดลงไปในชิ้นงาน ทำให้บ่าของตัวกวนเกิดการเสียดทานกับผิวชิ้นงานที่นำมาเชื่อมจนชิ้นงานเกิดการอ่อนตัว และในขณะเดียวกันที่ตัวกวนมีการเคลื่อนที่ก็จะทำให้ชิ้นงานเกิดการเชื่อมประสานกัน เมื่อสิ้นสุดระยะความยาวของแนวเชื่อมตัวกวนจะถูกยกขึ้นที่ปลายแนวเชื่อม [2] ตัวกวนที่ใช้ในการเชื่อมจะผลิตจากวัสดุแข็งที่ไม่มีการสั่นเปลี่ยนเหมือนลวดเชื่อมอาร์กทั่วไป โดยภาพที่ 1 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

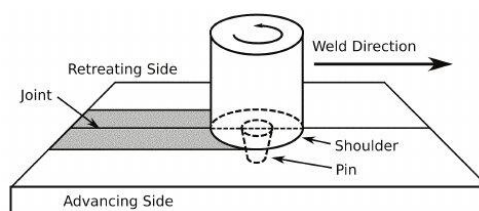
การออกแบบลักษณะของตัวกวน (ภาพที่ 2) และการเลือกตัวแปรเชื่อม นั้น มีความสำคัญมากต่อความสำเร็จของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยพื้นฐานแล้วการออกแบบลักษณะตัวกวนส่วนใหญ่จะประกอบด้วย 3 ส่วนประกอบหลัก คือ (1) บ่าของตัวกวน (Shoulder) (2) พิน (Pin) และ (3) ตัวบอดี้ (Body) ซึ่งใน 3 ส่วนนี้ตัวบ่าของตัวกวนจะมีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นบริเวณที่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนในขณะเสียดทานกับผิวชิ้นงาน และในขณะเดียวกันตัวพินจะช่วยกวนให้เนื้อวัสดุเกิดการผสมเข้าด้วยกัน นอกจากนี้ลักษณะของพินก็เป็นส่วนสำคัญที่จะควบคุมการไหลในสภาพพลาสติกของเนื้อวัสดุซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของแนวเชื่อมทั้งทางโลหะวิทยาและทางกล [3-4]

สำหรับการเชื่อมวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก (Strength-to-weight ratio) เช่น อะลูมิเนียมผสมโลหะผสมทองแดง และโลหะผสมแมกนีเซียม ซึ่งปกติเชื่อม

ได้ยากด้วยกระบวนการเชื่อมหลอมทั่วไป สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจึงมีข้อได้เปรียบที่สำคัญหลายประการที่สามารถนำมาใช้เชื่อมได้ แต่วิธีนี้ก็มีการเกิดขึ้นของข้อบกพร่องทั้งที่มองเห็นและซ่อนเร้นอยู่มากมายเช่นกัน หากไม่เข้าใจและเตรียมกระบวนการเชื่อมให้เหมาะสม [5] การก่อตัวของข้อบกพร่องในแนวเชื่อมส่วนใหญ่จะมาจากผลกระทบจากรูปแบบของตัวกวน (Tool pin profile) และตัวแปรในการเชื่อม [6-7] เป็นหลัก ดังนั้นการรวบรวมประเด็นการเกิดข้อบกพร่องในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจึงสำคัญและมีประโยชน์กับการเลือกใช้ตัวแปรเชื่อมเสียดทานแบบกวนให้เหมาะสมและให้สมบัติแนวเชื่อมที่ดีและเหมาะสมที่สุด



ภาพที่ 1 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และคำจำกัดความ [8]



ภาพที่ 2 ลักษณะของตัวกวน [9]

2. ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อม

ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีมากมายหลายประเภท ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแนวเชื่อม ในบทความปริทัศน์นี้ จะพูดถึงข้อบกพร่องประเภทต่างๆ ที่เกิดขึ้นบ่อยและปรากฏขึ้นมากที่สุดในระหว่างกระบวนการเชื่อม [10-11] โดยข้อบกพร่องดังกล่าวจะประกอบด้วย รูโพรง

(Tunnel) ครีป (Flash) การผสานที่ไม่สมบูรณ์ (Kissing bond) ช่องว่าง (Void/Wormhole) รอยแยก/ร่อง (Cavity/Groove) และรอยแตก (Cracks) ของแนวเชื่อม เป็นต้น

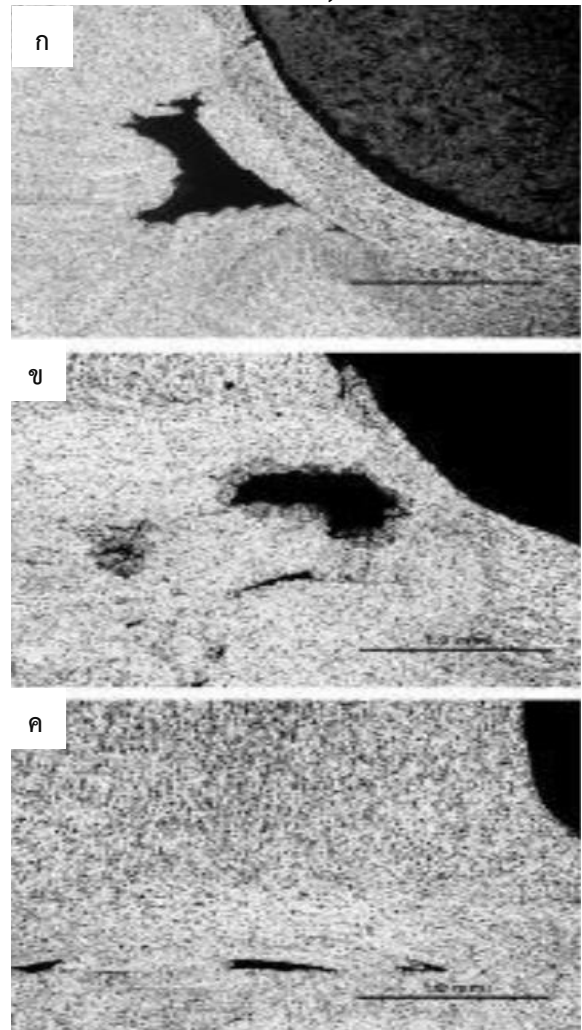
2.1 รูโพร่ง (TUNNEL DEFECT)

ข้อบกพร่องแบบรูโพร่งนี้ (ภาพที่ 3) ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ข้อของแนวเชื่อมต่อชนแบบตัวที่ (T-joint) (ภาพที่ 3(ก)-3(ค)) โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่บริเวณด้านแอดวานซิ่งเนื่องจากความร้อนนำเข้าไป (Heat input) และการไหลของเนื้อโลหะที่ไม่เพียงพอ Xiaopeng และคณะ [12] ได้ศึกษาทำเชื่อมที่มีผลต่อข้อบกพร่องและสมบัติทางกลของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสม AA6061T4 ในกรณีของรอยต่อแบบตัวที่ ลักษณะการไหลวนของเนื้อโลหะจะเกิดขึ้นในทิศทางแนวตั้งซึ่งมีความจำเป็นที่ต้องมีการเติมเนื้อโลหะเข้าไปในแนวเชื่อม การไหลวนของเนื้อโลหะในทิศทางแนวตั้งจะไม่สมบูรณ์ถ้าความร้อนนำเข้าไปไม่เพียงพอซึ่งจะนำไปสู่การเกิดรูโพร่งขึ้น ความร้อนนำเข้าไปและรูปแบบการไหลวนของเนื้อโลหะจะเป็นสองปัจจัยหลักในการจัดข้อบกพร่องประเภทนี้ โดยแนวทางที่แก้ไขได้คือการลดความเร็วเดินเชื่อมเพื่อช่วยเพิ่มความร้อนนำเข้าไปให้สูงขึ้น ซึ่งจะช่วยให้การไหลวนของเนื้อโลหะได้ดีขึ้น และลดการเกิดรูโพร่งอันเป็นข้อบกพร่องในแนวเชื่อม

หากตัวแปรของการเชื่อม เช่น ความเร็วเดินเชื่อม ความเร็วหมุนเชื่อม และอื่นๆ ไม่สามารถสร้างความร้อนนำเข้าไปเพียงพอในการผสานเนื้อโลหะได้ นั่นเป็นสาเหตุที่จะนำไปสู่การเกิดรูโพร่งในแนวเชื่อม ส่วนการกระจายความร้อนจากแนวเชื่อมที่เร็วเกินไปจะทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งและอาจเกิดการแตกหักได้ตลอดแนวเชื่อม Yong และคณะ [13] ได้ศึกษาลักษณะรูโพร่งและการผสานที่ไม่สมบูรณ์ในแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสม AA6063 แบบ T-joint นักวิจัยดังกล่าวได้ค้นพบว่า ขนาดของรูโพร่งจะใหญ่ขึ้นถ้าความเร็วในการเดินเชื่อมเพิ่มขึ้น และในการทดลองเชื่อมแบบ T-joint ที่ ความเร็วเดินเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที ไม่ปรากฏข้อบกพร่องในแนวเชื่อม

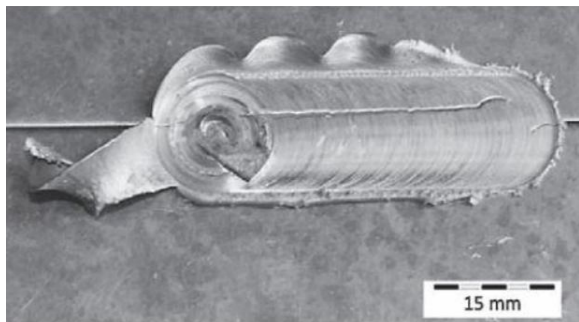
2.2 ครีป (FLASH DEFECT)

ชิ้นงานที่ต้องเผชิญกับความร้อนสูง เนื่องจากตัวกวนมีการหมุนด้วยความเร็วสูง ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้วัสดุ



ภาพที่ 3 ข้อบกพร่องแบบรูโพร่ง [12]

อ่อนตัวลงเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของชิ้นงานที่สัมผัสกับบ่าของตัวกวน และขณะเดียวกันก็จะถูกขับออกมาเป็นครีป (ภาพที่ 4) ความร้อนจากแรงเสียดทานที่บ่าของตัวกวนมากเกินไปจะทำให้วัสดุอ่อนตัวลงเนื่องจากความร้อนจากการเสียดสีหรือเสียดทาน แรงกดจากบ่าของตัวกวนที่มากเกินไปจะทำให้เกิดครีปในปริมาณมากกว่าปกติ และหลุดออกมาข้างๆ แนวเชื่อม จากการศึกษาของ Ravi และคณะ [14] ได้พบว่าข้อบกพร่องที่ผิวของชิ้นงานในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถตรวจสอบได้เทคนิคการประมวลผลด้วยภาพถ่าย และมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Paul และคณะ [15] ที่ตรวจพบข้อบกพร่องในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมด้วย



ภาพที่ 4 รอยร้าวและรอยแตกที่ผิวแนวเชื่อม [16]

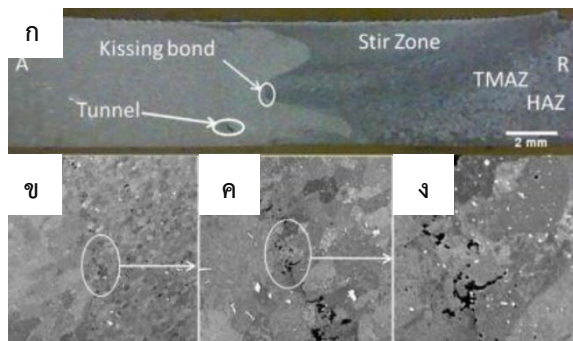
ความยาวของพินของตัวกวนที่ไม่สัมพันธ์กับความหนาของชิ้นงานและการเปลี่ยนแปลงความลึกของการกลดลง ในชิ้นงาน จะมีการแปรผันต่อการเกิดครีบตลอดแนวเชื่อม เมื่อพินของตัวกวนถูกบ่อนลึกมากเกินไป วัสดุในสภาพพลาสติกที่อยู่ใกล้พินจะถูกอัดขึ้นมาเป็นครีบ จากการศึกษาของ Kim และคณะ [17] ที่ได้ค้นพบข้อบกพร่องในแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวน พบว่าที่อัตราความเร็วหมุนเชื่อมสูงและความเร็วเดินเชื่อมต่ำ จะทำให้วัสดุเกิดการเสียรูปแบบพลาสติกมากกว่าปกติซึ่งจะนำไปสู่การเกิดครีบในปริมาณที่มากเกินไป

2.3 การผสานที่ไม่สมบูรณ์ (KISSING BOND DEFECT)

กรณีที่มีความเร็วเดินเชื่อมสูงและความเร็วหมุนเชื่อมต่ำ สำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม ชั้นผิวออกไซด์ของอะลูมิเนียม (Al_2O_3) จะถูกสลายบางส่วนเท่านั้น เพราะอัตราการกวนและความร้อนนำเข้าไม่เพียงพอซึ่งจะนำไปสู่การเสียรูปในสภาพพลาสติกที่ไม่สมบูรณ์ ด้วยเหตุนี้เอง ทำให้อนุภาคของอะลูมิเนียมออกไซด์บางส่วนได้แทรกเข้าไปบริเวณแนวเชื่อมจึงทำให้แนวเชื่อมผสานกันไม่สมบูรณ์ [15]

ในขณะเดียวกันนักวิจัย Noor และคณะ [18] ได้ค้นพบข้อบกพร่องรูโพรงและการผสานที่ไม่สมบูรณ์ในแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิด แรงกดและอัตราการกวนที่ไม่เพียงพอจะทำให้เกิดการผสานที่ไม่สมบูรณ์ ในสภาวะเช่นนี้ หากชั้นผิวออกไซด์ไม่ได้รับการกำจัดออกอย่างเหมาะสม จะทำให้เนื้อโลหะเดิมไม่สามารถผสานกันอย่างสมบูรณ์ได้ ข้อบกพร่องลักษณะนี้มักเกิดขึ้นที่จุดแนวเชื่อมใกล้กับราก (Root of the weld) ของแนวเชื่อมหรือส่วนของรอยต่อของโลหะเดิม (ภาพที่ 5(ก)-5(ง)) สาเหตุ

สำคัญของการเกิดข้อบกพร่องแบบนี้มาจากชั้นผิวออกไซด์ที่แทรกเข้าไปในเนื้อเชื่อม ขาดการเติมเนื้อวัสดุในเนื้อเชื่อม และการเกิดความเครียดในระหว่างการไหลที่สูงขึ้น การผสานที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้สมบัติทางกลของแนวเชื่อมลดลง ข้อบกพร่องนี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการปรับตั้งค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุต่างชนิด



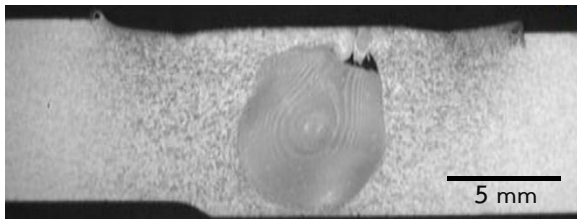
ภาพที่ 5 ภาพ SEM ของการผสานที่ไม่สมบูรณ์ [18]

นอกจากนี้ Xiaopeng และคณะ [12] ได้ศึกษาการเกิดข้อบกพร่องในแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสม AA6061T4 รอยต่อแบบ T-joints นักวิจัยสามารถจำแนกลักษณะการผสานที่ไม่สมบูรณ์ได้ 2 ประเภท คือ (1) การผสานไม่สมบูรณ์ตามยาว (Longitudinal) และ (2) การผสานไม่สมบูรณ์ตามขวาง (Traverse) ข้อบกพร่องข้างต้นนี้จะปรากฏขึ้นในบริเวณที่ถูกกวน (Nugget zone) หากเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมให้สูงขึ้น ทำให้ความยาวและขนาดความกว้างของข้อบกพร่องจะเพิ่มขึ้นด้วย [16, 19]

2.4 ช่องว่าง (VOID/WORMHOLE DEFECT)

ในทางเศรษฐศาสตร์ การใช้ความเร็วเดินเชื่อมที่สูงจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิต และให้ประสิทธิภาพในการผลิตสูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันความเร็วเดินเชื่อมที่สูงเกินไป จะทำให้เกิดช่องว่างในแนวเชื่อม โดยเฉพาะด้านบนหรือที่มุมด้านแอดวานซ์ของบริเวณแนวกวน ยิ่งเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมยิ่งทำให้เกิดช่องว่างในแนวเชื่อมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วย Ravi และคณะ [14] ได้ศึกษาลักษณะข้อบกพร่องที่แนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนโดยใช้หลักการประมวลผลด้วยภาพถ่าย ผลปรากฏว่าพบช่องว่างที่แนวเชื่อมหลายขนาด และมีการวางตัวในหลายทิศทาง ซึ่งไม่สามารถระบุลักษณะ

เฉพาะเจาะจงใดๆ ของช่องว่างหรือข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเหล่านี้ได้ ส่วน Leonard และคณะ [20] พบช่องว่างในแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสม ซึ่งช่องว่างที่ปรากฏขึ้นนั้นมีสาเหตุมาจากแรงกดของตัวกวนน้อยเกินไป และใช้ความเร็วเดินเชื่อมที่สูงกว่าปกติ ส่วนบ่าของตัวกวนที่ราบเรียบก็มีส่วนในการก่อให้เกิดช่องว่างตลอดแนวเชื่อมด้วย แต่อย่างไรก็ตามช่องว่างที่เกิดขึ้นเหล่านี้สามารถขจัดลงได้ด้วยการเสริมบ่าของตัวกวนให้มีขนาดใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 6 ช่องว่างด้านแอดวานซ์ของแนวเชื่อม [20]

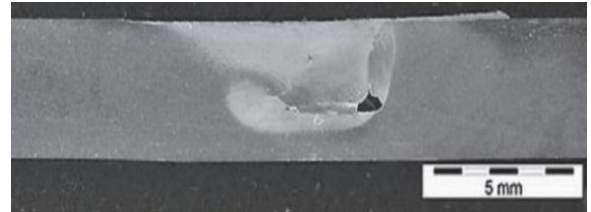
2.5 รอยแยกหรือร่อง (CAVITY OR GROOVE/ CHANNEL LIKE DEFECT)

ข้อบกพร่องที่พบบ่อยลักษณะหนึ่งคือรอยแยกหรือร่องซึ่งมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม ข้อบกพร่องประเภทนี้มันเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนนำเข้าไปไม่เพียงพอ ซึ่งความร้อนนำเข้าไปไม่เพียงพอนี้สามารถปรับแก้ได้ด้วยการเลือกตัวแปรเชื่อมที่เหมาะสม

โดยทั่วไปลักษณะรอยแยกหรือร่องที่พบบ่อยมักจะวางตัวตามยาวในแนวนอนตลอดทั้งแนวเชื่อม ดังนั้นการจำแนกประเภทของข้อบกพร่องชนิดนี้จึงใช้ความยาวของแนวแกนและการวางแนวของรอยแยก (ลักษณะวงรี) ที่เกิดขึ้นรอบๆ รอยแยกนั้น ฉะนั้นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นนี้จึงมีความยาวของแนวแกนที่ค่อนข้างใหญ่ (≥ 35 พิกเซล) รวมถึงการวางแนวจะอยู่ในช่วงทำมุม -25° ถึง 25° จึงสามารถระบุข้อบกพร่องประเภทนี้ว่าเป็นรอยแยกหรือร่อง [16-17]

ภาพที่ 7 แสดงรอยแยกที่มาจากการป้อนความร้อนนำเข้าไปไม่เพียงพอ ข้อบกพร่องลักษณะนี้จะมีผลอย่างมากต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม แต่สามารถขจัดออกได้โดยการเชื่อมซ่อมแซมด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อย่างไรก็ตามในแต่ละกระบวนการเชื่อมซ่อมก็จะมีผลที่แตกต่างกันออกไป กระบวนการเชื่อมซ่อมแบบเยื้องแนวให้สมบัติแนวเชื่อมดีกว่ากระบวนการเชื่อมซ่อมแบบตรงแนว และความ

แข็งแรงดึงของแนวเชื่อมซ่อมแบบเยื้องแนวนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับความแข็งแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมเดิม และนอกจากนี้ยังให้ค่าสูงถึงร้อยละ 78 เมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงของเนื้อโลหะเดิม [21]



ภาพที่ 7 รอยแยกเนื่องจากความร้อนนำเข้าไปไม่เพียงพอ [21]

2.6 รอยแตก (CRACKS AND CRACK LINE ROOT DEFECT)

รอยแตกของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนมักเกิดขึ้นบ่อยมาก โดยเฉพาะกับการเชื่อมวัสดุต่างชนิด เนื่องจากความแตกต่างด้านสมบัติของวัสดุเดิมที่ถูกนำมาเชื่อม จากผลการวิจัยของ Sang และคณะ [22] พบว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุต่างชนิดนั้นมีรอยแตกเกิดขึ้นที่บางตัวแปรเชื่อม เช่น ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,500 รอบต่อนาที แม้จะใช้ความเร็วเดินเชื่อมที่ค่าต่างๆ แล้วก็ตาม ความร้อนหรืออุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ขอบบ่าของตัวกวนซึ่งบริเวณดังกล่าวจะก่อให้เกิดการแตกร้าวขณะเหลว (Liquation crack) ข้อบกพร่องนี้เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงพอที่จะเร่งทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมแมกนีเซียมขึ้น

ตัวแปรเชื่อมมีสำคัญในการลดการเกิดข้อบกพร่องในแนวเชื่อม เช่น การแตกด้านหลัง (Root defects) แนวเชื่อมมีสาเหตุมาจากความร้อนนำเข้าไปไม่เพียงพอหรืออีกสาเหตุหนึ่งมาจากการสลายของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผิวด้านหลังแนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ความลึกที่ไม่เหมาะสมของพินที่กดลงไปขึ้นงานก็มีส่วนในการก่อให้เกิดรอยแตกที่แนวเชื่อมด้านแอดวานซ์ด้วย ถ้าความยาวของพินไม่สอดคล้องกับความหนาของชิ้นงานก็จะทำให้เกิดรอยแตกด้านหลังของแนวเชื่อม และอีกปัจจัยที่สำคัญคือแรงกดและมุมเอียงของตัวกวนที่ไม่เหมาะสมจะทำให้การซึมลึกไม่สมบูรณ์ซึ่งเป็นต้นเหตุหนึ่งในการเกิดรอยแตกด้านหลังแนวเชื่อมเช่นกัน [5]

3. การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุต่างชนิด

3.1 อะลูมิเนียมผสมกับเหล็ก (AL-STEEL)

อะลูมิเนียมผสมมีการนำไฟฟ้าที่ดี ขึ้นรูปได้ง่าย มีความแข็งแรงสูงและมีน้ำหนักเบา จึงได้รับความนิยมในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมต่อเรือ ตัวถังรถไฟ และโครงสร้างการบินและอวกาศ [23] และอื่นๆ อีกมากมาย ส่วนเหล็กนั้นโดยเฉพาะเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความแข็งแรงสูงและคงที่ มีความเหนียวสูงและทนต่อการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยม จึงเป็นวัสดุโครงสร้างที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ งานด้านการบินและอวกาศ ทั้งนี้เพื่อเป็นการประยุกต์ใช้ข้อดีของวัสดุดังกล่าวระหว่างอะลูมิเนียมผสมกับและเหล็กกล้าไร้สนิม จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาการเชื่อมของวัสดุดังกล่าวขึ้นเพื่อสามารถนำไปประยุกต์ในงานอื่นๆ ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โครงสร้างการบินและอวกาศ [24] และเครื่องใช้ในครัวเรือน เป็นต้น สำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมกับเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นเป็นเรื่องที่ยากและท้าทายช่างเชื่อมเป็นอย่างมาก เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีจุดหลอมเหลวแตกต่างกัน ถึงแม้ในปัจจุบันจะมีกระบวนการเชื่อมที่หลากหลาย และสำหรับการเชื่อมวัสดุต่างชนิดนั้น การเชื่อมเสียดทานแบบกวนถือเป็นกระบวนการเชื่อมแรกๆ ที่ช่างเชื่อมจะนิยมนำมาประยุกต์ใช้ [18] Huseyin และคณะ [25] ได้ทำการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม AA6013T4 กับเหล็กกล้าไร้สนิม X5CrNi18-10 พวกเขาสามารถสรุปได้ว่าสมบัติความล้าของแนวเชื่อมแน่นต่ำกว่าของอะลูมิเนียมผสมเดิมประมาณร้อยละ 30 ส่วน Takehiko และคณะ [26] ได้เชื่อมต่อกันอะลูมิเนียมผสมกับเหล็ก ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน พบว่าความแข็งแรงสูงสุดของแนวเชื่อมอยู่ที่ระยะออฟเซต 0.2 มิลลิเมตร ไปทางฝั่งแผ่นเหล็ก การควบคุมความเร็วหมุนเชื่อมที่เหมาะสมสามารถทำให้สมบัติแนวเชื่อมสมบูรณ์ หากการปรับความเร็วหมุนเชื่อมที่ต่ำหรือสูงเกินไปจะทำให้แนวเชื่อมมีข้อบกพร่องขึ้น และมีนักวิจัย Kimapong และคณะ [27] ได้เชื่อมต่อกันเหล็กเหนียว SS400 กับอะลูมิเนียมผสม AA5083 ผลที่ได้ปรากฏว่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมอยู่ที่ร้อยละ 86 ของความแข็งแรงเดิมของอะลูมิเนียมผสม

3.2 อะลูมิเนียมผสมกับทองแดง (AL-Cu)

ในปัจจุบันระบบการผลิตแบบไฮบริดระหว่างอะลูมิเนียมผสมกับทองแดงเป็นวิธีการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมในการรวมสมบัติเด่นของวัสดุแต่ละประเภทเข้าด้วยกัน และเป็นการปรับปรุงสมบัติทางกล ความร้อน และทางไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดน้ำหนักและประหยัดต้นทุนในการผลิต [3] อย่างไรก็ตาม การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุทั้งสองชนิดนี้ไม่ใช่เรื่องง่าย เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพ ทางกล และความสัมพันธ์ทางเคมีที่ต่างกัน ทำให้ช่างเชื่อมจำเป็นต้องปรับตัวแปรเชื่อมให้เหมาะสม เพื่อให้วัสดุมีการอ่อนตัวและผสมกันได้อย่างสมบูรณ์ และปราศจากข้อบกพร่องขึ้นในแนวเชื่อมด้วย [28-33] นักวิจัย Bisadi และคณะ [34] ได้เชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมผสม AA5083 และทองแดงบริสุทธิ์ ผลปรากฏว่าความร้อนนำเข้าที่น้อยเกินไปทำให้เกิดช่องว่างบริเวณฝั่งทองแดงนอกจากนี้ Xue และคณะ [35] ได้เชื่อมอะลูมิเนียมผสม AA1060 กับทองแดงบริสุทธิ์ ที่ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำกว่า 400 รอบต่อนาที พบว่ามีข้อบกพร่องจำนวนมากในบริเวณแนวแกน ในขณะที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมสูงกว่า 800 และ 1,000 รอบต่อนาที ทำให้เกิดแนวเชื่อมที่มีสมบัติทางโลหะวิทยาที่สมบูรณ์ โดยสรุปแล้วข้อบกพร่องและความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมระหว่างวัสดุต่างชนิด สามารถเกิดขึ้นได้โดยขึ้นอยู่กับการใช้ตัวแปรเชื่อมที่เหมาะสม

4. ข้อสรุป

จากการศึกษาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสม อะลูมิเนียมผสมกับทองแดง และอะลูมิเนียมผสมกับเหล็กกล้า นั้น สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ข้อบกพร่องของรูโพรงที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมเนื่องจากความร้อนนำเข้าและการไหลวนของเนื้อโลหะไม่เพียงพอ
2. ความร้อนจากการเสียดทานของบ่าของตัวกวนกับผิวชิ้นงาน และแรงกดของตัวกวนที่มากเกินไปจะทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวและก่อให้เกิดครีบขึ้นที่ผิวชิ้นงาน
3. แรงกดและการกวนเนื้อโลหะที่ไม่เพียงพอจะทำให้เกิดข้อบกพร่องในการผสมไม่สมบูรณ์



4. ช่องว่างที่เกิดขึ้น เนื่องจากแรงกดที่ไม่เพียงพอ และความเร็วเดินเชื่อมที่เร็วเกินไป รอยแยกหรือร่องที่เกิดขึ้นบริเวณแนวเชื่อม มีสาเหตุจากความร้อนนำเข้าไปที่ไม่เพียงพอ

5. รอยแตกที่งอที่เกิดขึ้น เกิดจากการไหลตัวของเนื้อโลหะในสภาพพลาสติกที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากความร้อนนำเข้าไปไม่เพียงพอเพราะความเร็วหมุนเชื่อมต่ำเกินไป

6. สำหรับการเชื่อมวัสดุต่างชนิดด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ที่ผ่านมายังถือว่าอยู่ในช่วงเริ่มต้น และมีงานวิจัยน้อยที่ได้รายงานถึงข้อบกพร่องดังกล่าว ซึ่งถือว่านักวิจัยควรดำเนินการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเชื่อมวัสดุต่างชนิด

เอกสารอ้างอิง

- [1] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Temple-Smith, and C. J. Dawes, "Friction stir butt welding. GB Patent No. 9125978.8," *International patent application* No. PCT/GB92/02203, 1991.
- [2] K. Kumar and S. V. Kailas, "The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation," *Materials Science and Engineering A*, vol. 485, no. 1-2, pp. 367-374, June 2008.
- [3] P. M. Mukuna and T. A. Esther, "Friction stir welding of dissimilar materials between aluminum alloys and copper - An overview," *Proceedings of the World Congress on Engineering 2013 Vol III*, WCE 2013, London, U.K., July 3-5, 2013.
- [4] X. Wang, Y. Xiao, L. Shi, M. Zhai, C. Wu, and G. Chen, "Revealing the mechanism of tool tilting on suppressing the formation of void defects in friction stir welding," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 25, pp. 38-54, July-August 2023.
- [5] A. I. Albannai, "Review the common defects in friction stir welding," *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 9, no. 11, pp. 318-329, November 2020.
- [6] N. Dialami, M. Cervera, and M. Chiumenti, "Defect formation and material flow in friction stir welding," *European Journal of Mechanics A/Solids*, vol. 80, 103912, March-April 2020.
- [7] R. Kesharwani, K. K. Jha, M. Imam, C. Sarkar, and I. Barsoum, "Correlation of microstructure, texture, and mechanical properties of friction stir welded Joints of AA7075-T6 plates using a flat tool pin profile," *Heliyon*, vol. 10, no. 3, e25449, 15 February 2024.
- [8] M. Akshansh, "Friction stir welding of dissimilar metal: A review," [Online]. (January 17, 2018). <https://ssrn.com/abstract=3104223> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3104223>, (Accessed: January 17, 2018).
- [9] A. D. Tyler, C. S. Yung, and Y. Bin, Y. "Observer-based adaptive robust control of friction stir welding axial force," 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Montreal, QC, Canada, July 6-9, 2010.
- [10] S. Neetesh, C. Sangam, A. Kumar, and V. R. Chary, "Defects formation during friction stir welding: A review," *International Journal of Engineering and Management Research*, vol. 7, no. 3, pp. 121-125, October 2016.
- [11] K. Sudhir, S. Rajender, and K. Puneet, "Comparative study of different welding processes and optimization methods: A review," *International Journal for Research in Engineering Application & Management*, vol. 5, no. 2, pp. 405-419, May 2019.
- [12] H. Xiaopeng, Y. Xinqi, C. Lei, and Z. Guang, "Influence of joint geometry on defects and mechanical properties of friction stir welded AA6061T4 T-joints," *Materials and design*, 53, 106-117, January 2014.
- [13] Z. Yong, Z. Lilong, W. Qingzhao, Y. Keng, and Z. Jiasheng, "Defects and tensile properties of

- 6013 aluminum alloy T-joints by friction stir welding,” *Materials and Design*, vol. 57, pp. 146-155, May 2014.
- [14] R. Ravi, R. K. Aaqib, P. Chirag, J. Rahul, P. M. Raju, P. Srikanta, K. P. Surjya and C. Debashish, “Classification and identification of surface defects in friction stir welding: An image processing approach,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 22, pp. 237-253, April 2016.
- [15] K. Paul, R. Richard, M. Jukka, and S. Raimo, “Investigation of weld defects in friction stir welding and fusion welding of aluminum alloys,” *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 10, 26, 2015.
- [16] P. Podrzal, B. Jerman, and D. Klobcar, “Welding defects at friction stir welding,” *Metabk*, vol. 54, no. 2, pp. 387-389, April 2015.
- [17] Y. G. Kim, H. Fujii, T. Tsumara, T. Komazaki, and K. Nakata, “Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy,” *Materials science and engineering A*, vol. 415, no. 1-2, pp. 250-254, January 2006.
- [18] Z. K. Noor, N. S. Arshad, A. K. Zahid, and K. S. Suha, “Investigation on tunneling and Kissing bond defects in FSW joints for dissimilar aluminum alloys,” *Journal of alloys and Compounds*, vol. 648, pp. 360-367, November 2015.
- [19] A. Mubeen, A. Saquib, N. S. Arshad, A. K. Zahid, C. Xizhang, K. Sergey, A. Aisha, S. Shafquat, and I. Hashmatullah, “Defect formation during dissimilar aluminum friction stir welded T-joints,” *Mechanics & Industry*, vol. 21, no. 2, 205, February 2020.
- [20] A. J. Leonard and S. A. Lockyer, “Flaws in friction stir welds,” *4th international symposium on friction stir welding*, Park City, Utah, USA, 2003.
- [21] H. J. Liu and H. J. Zhang, “Repair welding process of friction stir welding groove defect,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 19, no. 3, pp. 563-567, June 2009.
- [22] W. S. Sang, H. L. Sang, C. K. Byung, J. Y. Tae, K. K. Nam, B. K. In, and Y. K. Chung, “Liquation cracking of dissimilar aluminum alloys during friction stir welding,” *Materials Transactions*, vol. 52, no. 2, pp. 254-257, September 2010.
- [23] M. Z. A. Mohamed, M. E. S. Mohamed, F. Dariusz, and C. Gürel, “Friction stir welding of aluminum in the aerospace industry: The current progress and state-of-the-art review,” *Materials*, vol. 16, no. 8, 2971, pp. 1-33, April 2023.
- [24] N. Mohamed, J. Matias, J. Antti, F. Hidetoshi, and A. A. A. Hamed, “Friction stir welding of dissimilar Al6061T6 to AISI316 stainless steel: Microstructure and mechanical properties,” *Materials*, vol. 16, no. 8, 4085, pp. 1-21, May 2023.
- [25] U. Huseyin, D. D. Claudio, A. Alberto, G. Tommaso, and G. Carla, “Friction stir welding of dissimilar Al6013T4 to X5CrNi18-10 stainless steel,” *Materials and Design*, vol. 26, no. 1, pp. 41-46, February 2005.
- [26] Takehiko, W., Hirofumi, T., & Atsushi, Y. (2006). Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 178, 342-349.
- [27] K. Kimapong and T. Watanabe, “Friction stir welding of aluminum alloy to steel,” *Welding journal*, vol. 83, no. 10, 277S-288S, October 2004.
- [28] I. Galvão, D. Verdera, D. Gesto, A. Loureiro, and D. Rodrigues, “Analyzing the challenge of



aluminum to copper FSW,” CEMUC, Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal.

- [29] W. N. Aris, A. R. Khukuh, and B. N. R. Muhammad, “The effect of rotational tool speed on dissimilar joint aluminum-copper plate friction stir welded joint,” *Semesta Teknika*, vol. 26, no. 2, pp. 128-136, November 2023.
- [30] F. Kishan, B. Vishvesh, D. O. Ankit, P. Chander, B. Dharam, D. Saurav, and N. I. Vatin, “Microstructure and mechanical properties analysis of Al/Cu dissimilar alloys joining by using conventional and bobbin tool friction stir welding,” *Materials*, vol. 15, no. 15, 5159, July 2022.
- [31] J. Fan, W. Wenquan, Z. Xinge, and G. Wenbiao, “Microstructure and mechanical properties of friction stir lap welding joint of Al/CU dissimilar metals,” *Metals*, vol. 13, no. 12, 1969, November 2023.
- [32] S. Ibrahim, P. S. Virendra, A. Mohammad, E. E. Noah, I. M. Abdelhamid, and N. Majid, “Effect of rotational speed and penetration depth on Al-Mg-Si welded T-joints through underwater and conventional friction stir welding,” *Journal of Advanced Joining Processes*, vol. 9, 100207, June 2024.
- [33] J. A. Hamed and G. Ivan, “Characterization of friction stir welded Al-4Cu-Mg alloy/Al-16Si-4Cu-10SiC composite joint,” *Journal of Advanced Joining Processes*, vol. 9, 100192, June 2024.
- [34] H. Bisadi, A. Tavakoli, M. T. Sangsaraki, and K. T. Sangsaraki, “The influences of rotational and welding speeds on microstructures and mechanical properties of friction stir welded Al5083 and commercially pure copper sheets lap joints,” *Materials and Design*, vol. 43, 80-88, January 2013.
- [35] P. Xue, D. R. Ni, D. Wang, B. L. Xiao, and Z. Ma, “Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 528, no. 13-14, 4683-4689, May 2011.