สมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 2024 ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในสภาวะกระบวนการทางความร้อนที่แตกต่างกัน

Mechanical Properties of Aluminum Semi-Solid Casting 2024 by Friction Stir Welded Joints in Different Heat-Treated-State

วรพงศ์ บุญช่วยแทน* และสุรสิทธิ์ ระวังวงศ์

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

ประภาศ เมืองจันทร์บุรี

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Worapong Boonchouytan* and Surasit Rawangwong

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Srivijaya, Baoyang, Mueang, Songkhla 90000

Prapas Muangjunburee

Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering,

Prince of Songkla University, Kor Hong, Hat Yai, Songkhla, 90112

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือ การศึกษากระบวนการทางความร้อนที่แตกต่างกันของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 2024 ซึ่งประกอบด้วย 4 สภาวะ ได้แก่ (1) ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (W) (2) ผ่านกระบวนการทางความร้อนก่อนการเชื่อม (TW) (3) ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม (WT) และ (4) ผ่านกระบวนการทางความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม (TWT) จากผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนทุกสภาวะมีค่าสูงกว่าเนื้อโลหะเดิม เช่นเดียวกันค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อนำรอยเชื่อมไปผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม นอกจากนี้มีการปรากฏของรอยแตกร้าวในรอยเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม ซึ่งเป็นผลจากอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อน ค่าความแข็งสูงสุดที่สภาวะการเชื่อม TW ในบริเวณ SZ มีค่า 138 Hv และรอยเชื่อม WT ซึ่งเป็นรอยเชื่อมที่มีผลค่าความแข็งแรงดึงดีที่สุด คือ 242 MPa

***ผู้รับผิดชอบบทความ :** worapong.b@rmutsv.ac.th DOI 10.14456/tstj.2015.40

คำสำคัญ : อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง; กระบวนการทางความร้อน; การเชื่อมเสียดทานแบบกวน

Abstract

This research aims to study different heat treatments in friction stir welding of aluminum cast semi-solid metal 2024. The heat treatments consisted of four conditions: (1) no heat treatment (W), (2) pre heat treatment (TW), (3) post heat treatment (WT), and (4) pre/post heat treatment (TWT). From the experiment, the hardness of the joints that through heat treatment of all conditions is higher than the base materials. Likewise, the tensile strengths of the joints increased when the joints were post heat treatment. In addition, the joints showed the cracks in the process of pre/post heat treatment, due to the influence of heat treatment. In addition, the maximum hardness at a condition TW in area SZ is 138 Hv, and the weld WT has good tensile strength 242 MPa.

Keywords: aluminum semi-solid casting; pre/post heat treatment; friction sir welding

1. บทนำ

การเชื่อมอะลูมิเนียมหรือการประสานอะลูมิ-เนียมเข้าด้วยกันเป็นความท้าทายความสามารถสำหรับนักออกแบบและนักพัฒนาเทคโนโลยี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคนิคการเชื่อมแบบหลอมละลายของวัสดุอะลูมิ-เนียมผสม คือ การรักษาความร้อนบริเวณรอยเชื่อมเป็นเรื่องที่ยากลำบาก และจะเกิดข้อบกพร่องในรอยเชื่อมตามมา เช่น รอยแตกร้าว และรูพรุนที่เกิดขึ้นได้ง่ายในขณะที่กำลังเชื่อม [1] นอกจากการเชื่อมแบบหลอมละลายมักจะนำไปสู่การเสื่อมสภาพลงของสมบัติทางกลของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงของเฟสในบริเวณรอยเชื่อมอีกด้วย

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (friction stir welding, FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมแบบใหม่และมีแนวโน้มที่สามารถผลิตได้ มีต้นทุนต่ำ และรอยเชื่อมมีคุณภาพสูง โดยเฉพาะการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม การรักษาความร้อนบริเวณรอยเชื่อมเป็นไปได้อย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับอะลูมิเนียมที่ยากต่อการเชื่อมประกอบ เช่น 2xxx และ 7xxx [2,3] กระบวนการเชื่อมดังกล่าวได้รับการนิยมใช้มากในอุตสาหกรรมการบิน รถไฟ เรือ รวมไปถึงยานยนต์ เป็นต้น [4] การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งโดยที่โลหะที่เชื่อมจะไม่ละลายระหว่างการเชื่อม เทคนิคนี้ใช้เหล็กเครื่องมือทรงกระบอกหมุนบนเนื้อวัสดุให้เกิดความร้อนจากแรงเสียดทาน ผลกระทบของแรงเสียดทานทำให้เกิดความร้อนในเนื้อวัสดุทั้งสองจนอยู่ในสภาวะพลาสติก เกิดการเคลื่อนย้ายของเนื้อวัสดุสลับกันไปมาด้วยความเร็วหมุนเชื่อมที่เป็นปัจจัยในการเชื่อม ประกอบด้วยกันกับความเร็วเดินเชื่อมทำให้วัสดุทั้งสองติดกันในที่สุด อย่างไรก็ตามสภาวะพลาสติกที่เกิดขึ้นเกิดจากการหมุนของเครื่องมือเชื่อมที่บ่ากวน ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมแตกต่างกันทั่วทั้งบริเวณ บริเวณที่เห็นได้ชัดที่สุดของการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่อยู่บริเวณตรงการรอยเชื่อมเรียกว่า บริเวณแนวกวน (stir zone, SZ) [5] บริเวณนี้แสดงให้เห็นโครงสร้างที่ละเอียดเกิดการสลายตัวของอนุภาคต่าง ๆ ที่อยู่ภายใน บริเวณที่จะอยู่ใกล้เคียงกับ SZ จะเรียกว่า

บริเวณได้รับผลกระทบความร้อนทางกล (thermo mechanical zone, TMAZ) ถึงแม้ว่าโซนนี้ไม่ได้รับผลกระทบจากการหมุนกวนของเครื่องมือโดยตรงแต่เนื่องจากความร้อนที่สะสมอยู่มากจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะการบิดเบี้ยวของเกรนที่ไม่มีรูปทรง [6] บริเวณที่ติดกับบริเวณ TMAZ เรียกว่าบริเวณกระทบร้อน (heat effected zone, HAZ) ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงของเกรนไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณ TMAZ และสุดท้ายบริเวณเนื้อโลหะเดิม (base metal, BM) เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบใด ๆ จากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

อะลูมิเนียมผสม 2024 เป็นอะลูมิเนียมที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงดึงด้วยการผ่านกระบวนการทางความร้อน เมื่อทำกระบวนการอบละลายของแข็ง (solution heat treated) และจุ่มลงในน้ำ (quenching) ต่อจากนั้นทำการบ่มเทียม (artificially aged) เกิดการตกตะกอนของเฟส Al_2CuMg แต่สมบัติทางกลในรอยเชื่อมจะมีค่าต่ำเพราะความร้อนระหว่างทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะส่งผลให้เกิดการสลายตัวของเฟส Al_2CuMg [6-9] ก่อให้เกิดการการอ่อนตัวของรอยเชื่อมและการอ่อนค่าลงของสมบัติทางกล [8,10-12] ดังนั้นการเรียกคืนของการสูญเสียค่าด้านสมบัติทางกลในรอยเชื่อมมีทางเลือกหนึ่งคือการทำกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม เพื่อรักษาส่วนประกอบของเฟส Al_2CuMg ในรอยเชื่อมไว้ให้ได้ [13]

การศึกษาทางด้านผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (pre/post weld heat treatment, PWHT) อะลูมิเนียมผสมมีการศึกษางานวิจัยมาบ้างแล้วดังนี้ [14] พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนโลหะผสมอะลูมิเนียม 2219-O ที่ดีขึ้นด้วยการทำกระบวนการ PWHT อย่างมีนัยสำคัญ [15] พบว่ากระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม 2024 ได้ดีที่สุด [10] นอกจากนี้กระบวนการของ PWHT ส่งต่อสมบัติทางกล (ความแข็งแรงดึง) ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียม 6061 ลดลง 40-45% เมื่อเทียบกับความแข็งแรงดึงเนื้อวัสดุเดิม (Base Metal; BM) ซึ่งการลดลงของความแข็งแรงดึงนี้ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยการทำ artificially aged หลังจากการเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ [13] มีการนำ PWHT ไปใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสม 7449 พบว่า PWHT ส่งผลกระทบอย่างมากต่อเกรนในบริเวณแนวกวนและบริเวณได้รับผลกระทบความร้อนทางกล และสมบัติทางกล (ความแข็ง) ในบริเวณ SZ และ TMAZ ลดลง [16] โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณรอยเชื่อมมีความละเอียดกว่าเนื้อโลหะเดิม ทั้งด้านแอดวานซ์ซิงไซด์ และด้านรีทรีทติ้งไซด์ ซึ่งเกิดการบิดเบี้ยวของเกรนไม่เป็นรูปร่าง เนื่องจากการหมุนของหัวกวน และเกิดรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมเนื่องจากกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม [17] ความเร็วหมุนเชื่อมของหัวกวน ความเร็วเดินเชื่อม และอิทธิพลทางความร้อนหลังการเชื่อมมีผลโดยตรงต่อรอยเชื่อมเกิดรอยแตกร้าวทั่วบริเวณ อีกทั้งพบว่าเมื่อยิ่งเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมรอยแตกร้าวก็มากขึ้นตามไปด้วย จากงานวิจัยดังที่ได้แสดงมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าอลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง 2024 ยังไม่มีการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางความร้อนและกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังนั้น

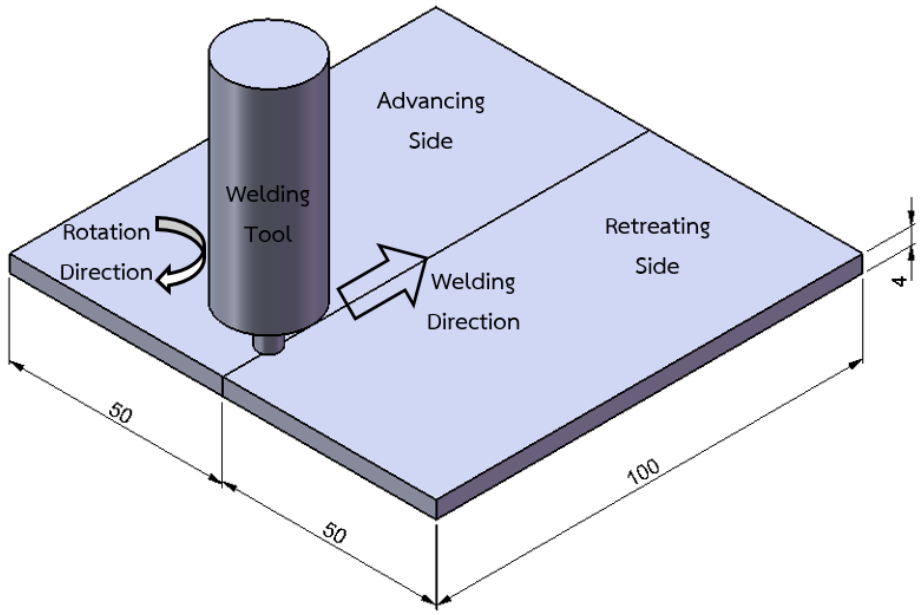
จุดมุ่งหมายของงานวิจัยในครั้งนี้ คือ การศึกษากระบวนการทางความร้อนที่แตกต่างกันของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 2024 เพื่อรักษาสมบัติทางกลของรอยเชื่อมและการ

ตรวจสอบโครงสร้างของรอยเชื่อมที่สภาวะทางความร้อนต่าง ๆ กัน

2. วัสดุ อุปกรณ์ และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและสภาวะในการเชื่อม

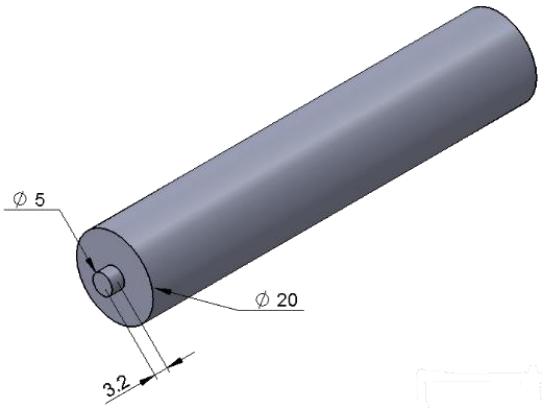
การวิจัยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งมีองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อวัสดุเดิมที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 1 รอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนใช้อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งที่ผ่านการแปรรูปให้มีขนาด 50 x 100 x 4 มิลลิเมตร (mm) วางเชื่อมต่อชนในท่าราบบนอุปกรณ์จับยึดงานเชื่อมซึ่งมีแผ่นเหล็กรองด้านล่างของรอยเชื่อม โดยใช้เครื่องกัดแนวตั้งเป็นเครื่องเชื่อม แสดงดังรูปที่ 1 อุปกรณ์ประกอบการเชื่อม คือ หัวเชื่อม ทำจากเหล็กเครื่องมือ SKD11 มีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่บริเวณลำตัวเรียกว่า บ่ากวน มีขนาด 20 mm และที่บริเวณปลายเรียกว่า หัวพิน มีขนาด 5 mm ยาว 3.2 mm แสดงดังรูปที่ 2 หัวเชื่อมหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา การเดินรอยเชื่อมชิ้นงานจะเคลื่อนที่ หัวเชื่อมจะอยู่กับที่เอียงมุม 3 องศา ความเร็วหมุนของหัวเชื่อมที่ 710 รอบต่อนาที (rpm) และความเร็วในการเดินรอยเชื่อมที่ 160 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) [18] จากกระบวนการเชื่อมดังกล่าวทำให้เกิดด้านของการเชื่อม 2 ด้าน คือ ด้านแอ๊ดวานซ์ซิ่งไซด์ (advancing side, AS) และด้านรีทรีทติ่งไซด์ (retreating side, RS) แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะการวางแนวการเชื่อม

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 2024

Cu	Mg	Zn	Fe	Si	Ti	Cr	Mn	Al
4.3	1.6	0.25	0.5	0.5	0.15	0.1	0.3	Balance



รูปที่ 2 เครื่องมือเชื่อม “หัวเชื่อม”

2.2 กระบวนการทางความร้อน

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง 2024 ที่ผ่านการหล่อด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบอัด (squeeze casting) ด้วยกระบวนการหล่อแบบการปล่อยฟ่นฟองแก๊ส (gas induced semi solid, GISS) [19] โดยมีค่าสมบัติทางกลของเนื้อวัสดุเดิมแสดงดังตารางที่ 2 รูปแบบของการวิจัยจะศึกษาถึงลำดับสภาวะของกระบวนการทางความร้อนที่แตกต่างกันก่อนและ/หรือหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมี 4 รูปแบบ ด้วยกัน คือ (1) ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (W) (2) ผ่านกระบวนการทางความร้อนก่อนการเชื่อม (TW) (3) ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม (WT) และ (4) ผ่านกระบวนการทางความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม (TWT)

กระบวนการ PWHT จะมีขั้นตอน คือ การอบละลายของแข็งที่อุณหภูมิ 480 °C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง แล้วชุบในน้ำ และตามด้วยการบ่มเทียมที่ 225 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง [20] โดยมีค่าสมบัติทางกลของเนื้อวัสดุเดิมเมื่อผ่านกระบวนการ PWHT แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ค่าสมบัติทางกลของเนื้อวัสดุเดิม

Mechanical properties base			
Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness test (Hv)
164	131	3.9	92

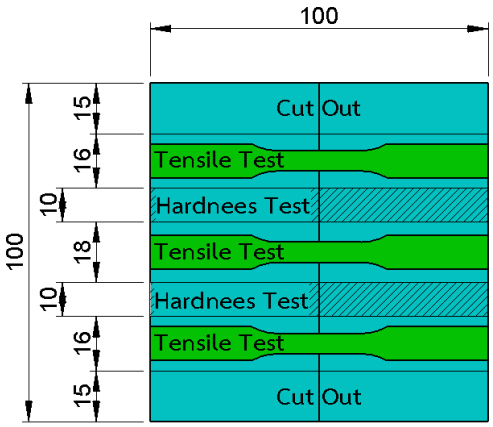
ตารางที่ 3 ค่าสมบัติทางกลของเนื้อวัสดุเดิมเมื่อผ่านกระบวนการ PWHT

Mechanical properties Base T6			
Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness test (Hv)
264	211	2.5	114

2.3 การเตรียมทดสอบสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกล

หลังจากเชื่อมชิ้นงานตามที่กำหนดในตัวแปรแล้วก็นำชิ้นงานมาสเกตแบบเพื่อที่จะตัดแบ่งชิ้นงานทดลองไปตรวจสอบสมบัติทางโลหะวิทยา และสมบัติทางกล โดยชิ้นงานทดลองจะตัดตามขวางกับรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 3 ประกอบด้วย 3 บริเวณ คือ ส่วนแรกเป็นบริเวณสำหรับทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึง (tensile test) จะมีจำนวนชิ้นงานทดสอบทั้งหมด 3 ชิ้นต่อ 1 สภาวะการทดลอง ส่วนที่สองเป็นบริเวณสำหรับตรวจสอบสมบัติทางโลหะวิทยา พร้อมกันนี้บริเวณนี้จะทำการทดสอบสมบัติทางกล

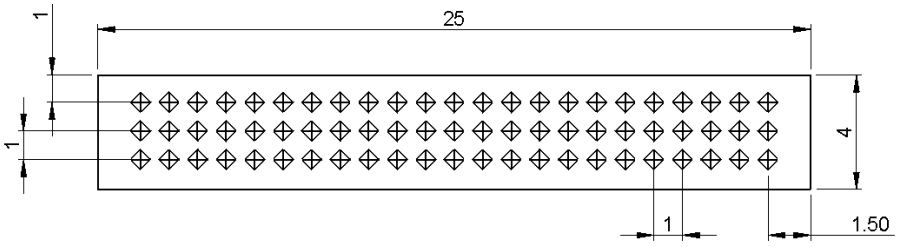
ด้านความแข็ง (hardness test) ด้วยซึ่งจะมีจำนวนชิ้นงานทดสอบทั้งหมด 2 ชิ้นต่อ 1 สภาวะการทดลอง และส่วนที่สามจะเป็นบริเวณส่วนหัว และท้ายของชิ้นงานทดลองจะเป็นส่วนที่ตัดทิ้งไป



รูปที่ 3 แบบสเกตเพื่อที่จะตัดแบ่งชิ้นงานทดลอง

การตรวจสอบสมบัติทางโลหะวิทยา เมื่อนำชิ้นงานทดลองจากการตัดตามการสเกตแล้ว จากนั้นนำชิ้นงานทดลองไปหล่อเรซิน แล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 360-1200 ตามลำดับ แล้วขัดต่อด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้ผงขัดอะลูมิน่าขนาด 5, 1 และ 0.3 ไมโครเมตร (μm) ตามลำดับ เมื่อขัดเสร็จให้นำไปล้างด้วยแอลกอฮอล์บริสุทธิ์แล้วนำไปกัดกรดด้วยสารละลายเจือจาง Keller's reagent นำไปส่องดูโครงสร้างทางมหภาค และโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบลำแสง เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของเกรนที่เกิดจากอิทธิพลของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนและของกระบวนการ PWHT ที่บริเวณรอยเชื่อม

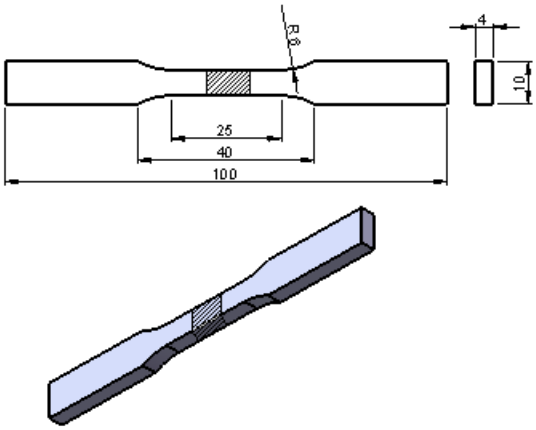
การทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งชิ้นงานเมื่อผ่านการทดสอบสมบัติทางโลหะวิทยาแล้วนำมาล้างด้วยแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ จากนั้นนำมาทดสอบความแข็งโดยใช้เครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม แบ่งออกเป็น 3 แถว คือ บน กลาง และล่าง แสดงดังรูปที่ 4 แล้วนำทั้ง 3 แถว ข้างต้นมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของค่าความแข็งของรอยเชื่อมในตำแหน่งนั้น ๆ โดยการกดจะเริ่มกดตั้งแต่ตรงกลางรอยเชื่อมออกไปทั้งสองข้างของรอยเชื่อม ระยะห่างของรอยกดแต่ละจุด 1.0 mm ระยะห่างแต่ละแถว 1 mm และระยะห่างจากจุดศูนย์กลางรอยเชื่อมออกไปข้างละ 12.5 mm โดยแรงกดที่ใช้ 100 กรัม (g) และเวลาในการกด 10 วินาที (s)



รูปที่ 4 ลักษณะการทดสอบทางกลด้านความแข็ง

การทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึง ชิ้นงานทดลองที่ได้จากการตัดแบ่งจากรูปที่ 3 นำมาแปรรูปด้วยเครื่องกัดแนวตั้งให้มีชิ้นงานพร้อมทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึงตามมาตรฐานการทดสอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM-E8M เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม โดยให้

รอยเชื่อมอยู่ตรงกลางของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 5 ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ด้วยอัตราเร็วในการดึงที่ 1 mm/min ฉะนั้นในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อ 1 การทดลอง จะประกอบไปด้วย 4 สภาวะ คือ W, TW, WT และ TWT ดังนั้นการทดลองงานวิจัยครั้งนี้มี 4 สภาวะ และทำซ้ำ 3 ซ้ำ เพื่อลดค่าความแปรปรวนและเพิ่มค่าความแม่นยำของข้อมูล ทำให้การทดลองในครั้งนี้มีทั้งหมด 12 การทดลอง

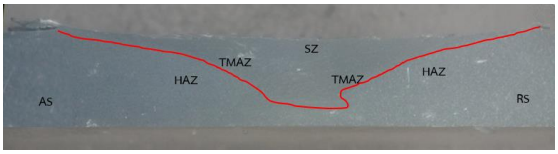


รูปที่ 5 ชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึงมาตรฐาน ASTM-E8M

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางโลหะวิทยา

รอยเชื่อมของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 2024 ประกอบด้วยหลายบริเวณที่เกี่ยวข้องกันระหว่างโครงสร้างทางมหภาคกับโครงสร้างจุลภาค เช่น SZ, TMAZ, HAZ และ BM แสดงดังรูปที่ 6 แต่ละบริเวณมีความแตกต่างกันซึ่งมีผลมาจากอิทธิพลของความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างชิ้นงานทดลองกับหัวเชื่อม และกระบวนการทางความร้อน โดยเฉพาะในบริเวณ SZ และ TMAZ ซึ่งส่งผลให้เกิดการผสมกันของเนื้อโลหะที่ซับซ้อน [13] นอกจากนี้ทำให้เกิดด้านของการเชื่อม คือ ด้านแอ๊ดวานซ์ซิ่งไซด์ (advancing side, AS) และด้านรีทรีทติ่งไซด์ (retreating side, RS) โดยที่ด้าน AS คือด้านที่เกิดหมุนอัดของหัวเชื่อมเข้ามาภายในเนื้อวัสดุ ส่วนด้าน RS คือด้านที่หมุนยืดของหัวเชื่อมออกจากเนื้อวัสดุ

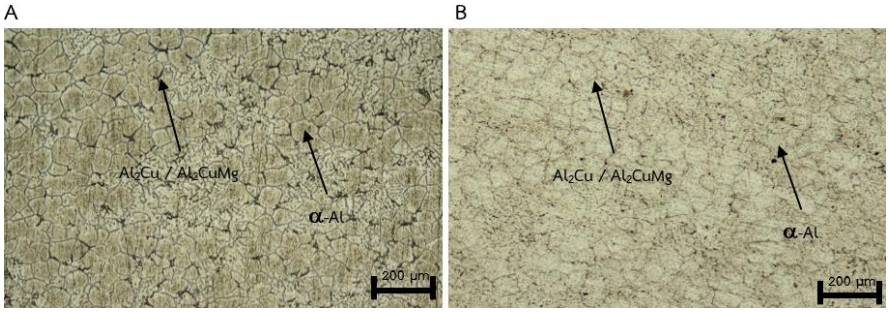


รูปที่ 6 บริเวณที่เกี่ยวข้องกันระหว่างโครงสร้างทางมหภาคกับโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

โครงสร้างจุลภาคเนื้อวัสดุเดิมทั้งที่ไม่ผ่านกระบวนการ PWHT และผ่านกระบวนการ PWHT แสดงดังรูปที่ 7A และ 7B ตามลำดับ พบว่าบริเวณเนื้อวัสดุเดิมที่ไม่ผ่านกระบวนการ PWHT ประกอบไปด้วยเฟสแอลฟ่า (α) แบบก้อนกลมผสมกับเฟสยูเทคติก (eutectic) ประกอบไปด้วย α + Al_2Cu / Al_2CuMg [21] มีลักษณะเป็นก้อนกลมต่อเนื่องกันมีเฟส Al_2Cu จับกลุ่มรอบเฟส α-Al ส่วนบริเวณเนื้อวัสดุเดิมที่ผ่านกระบวนการ PWHT พบว่ามีการแพร่ของเฟส Al_2Cu / Al_2CuMg ออกจากเฟส eutectic และละลายเข้าสู่เนื้ออะลูมิเนียมเมตริกซ์ [21]

โครงสร้างจุลภาคของรูปที่ 8 (A-D) คือลักษณะของรอยเชื่อม W, TW, WT และ TWT ตามลำดับ มีความแตกต่างกันของเนื้อวัสดุในบริเวณ SZ และ TMAZ อย่างเห็นได้ชัด โดยที่บริเวณ SZ มีความละเอียดมากกว่าบริเวณ TMAZ ซึ่งในบริเวณ TMAZ เห็นว่ามีเนื้อโลหะเดิมที่เป็นเกรนลักษณะก้อนกลมเหลืออยู่ ลักษณะแบบนี้เกิดจากบริเวณ SZ โดนหัวพินหมุนวนในเนื้อวัสดุโดยตรง ส่วนบริเวณ TMAZ โดนหัวพินหมุนวนในเนื้อวัสดุเพียงบางส่วนเท่านั้นจึง

ทำให้เกิดความแตกต่างกันของเนื้อวัสดุ อีกทั้งบริเวณรอยต่อระหว่างเขต HAZ กับด้าน RS และ AS ก็เกิดการเปลี่ยนแปลงของเกรนที่เห็นได้ชัดเจน ในรอยเชื่อม W, TW, WT และ TWT มีอินเตอร์เฟซที่ชัดเจนระหว่าง SZ และ TMAZ ในด้านของการเชื่อมทั้งสองโดยเฉพาะในบริเวณ SZ ไม่เห็นร่องรอยของโครงสร้างเกรนเดิมเนื้อวัสดุเดิม เนื่องจากความร้อนจากแรงเสียดทานระหว่างหัวพินกับเนื้ออะลูมิเนียมทำให้เกิดการแตกละเอียดของโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม และเฟส eutectic ส่วนบริเวณ TMAZ เกรนเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิม เกิดการบิดเบี้ยวของเกรนที่มีผลมาจากการหมุนเชื่อมของหัวเชื่อม ส่วนรอยเชื่อม TWT ปรากฏรอยแตกร้าว (crack) ตำแหน่งที่ลูกศรชี้คือรอยแตกร้าวในรอยเชื่อม เป็นผลเนื่องมาจากอิทธิพลของกระบวนการ PWHT [10,14,22]

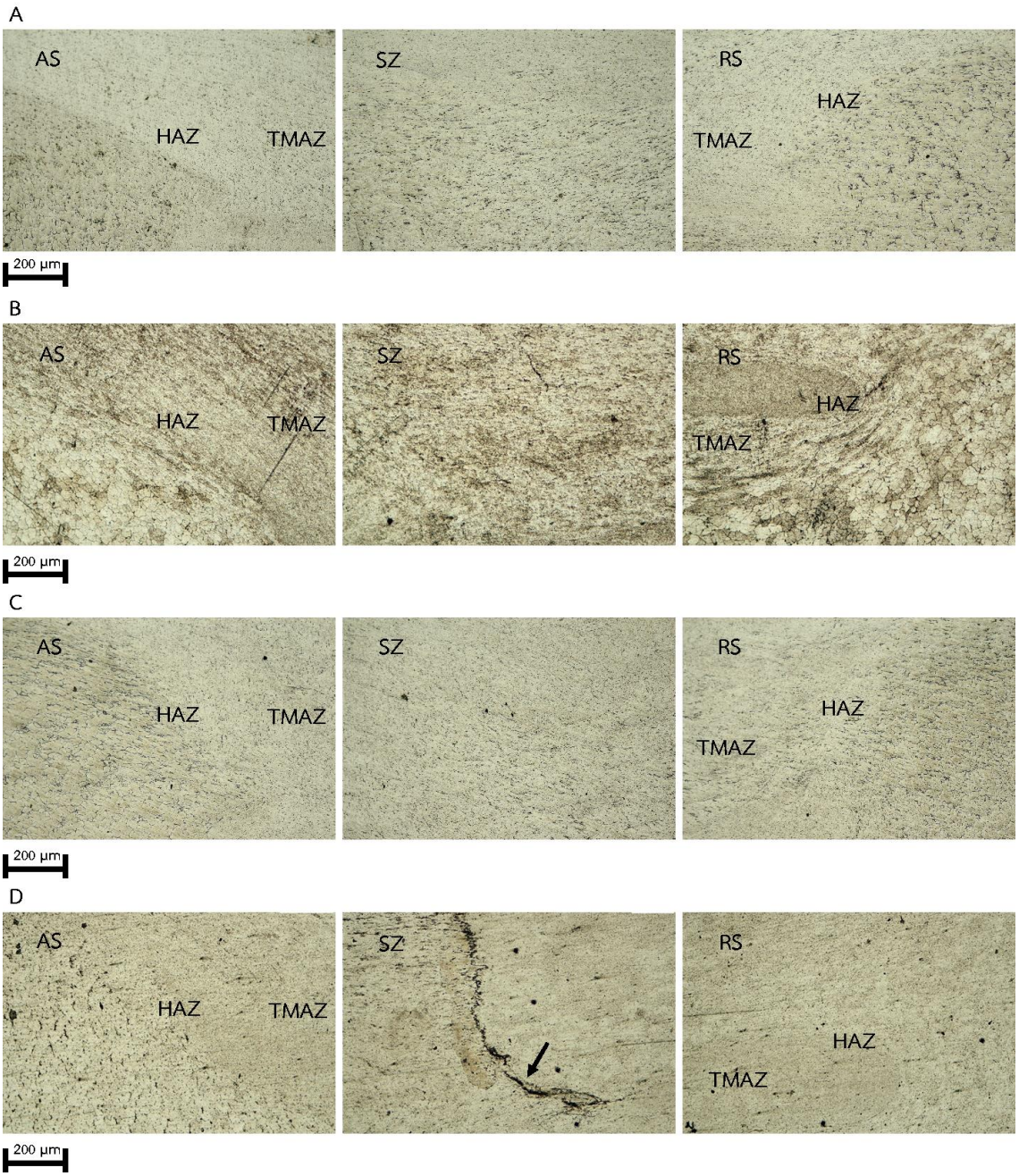


รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อวัสดุเดิม

บริเวณโครงสร้างทางจุลภาคในรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนเกิดการเปลี่ยนแปลงของเกรนแสดงดังรูปที่ 8 (A-D) ลักษณะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เหมือนกันทั้ง 4 สภาวะการทดลอง การเปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่เกิดจากความร้อนจากแรงเสียดทานส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค อีกทั้งยังเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคที่เป็นผลมาจากอิทธิพลของกระบวนการ PWHT ด้วย [23] ปัจจัยที่จะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างมีดังต่อไปนี้ : (ก) การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความเร็วเดินเชื่อม (ข) การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความเร็วหมุนเชื่อม และ (ค) ความร้อนจากแรงเสียดทานระหว่างหัวเชื่อมกับชิ้นงานทดลอง [24] นอกจากนี้ยังมีปัจจัยเสริมอีก เช่น ลำดับของการทำกระบวน PWHT ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างไม่เพียงเฉพาะบริเวณ SZ หรือ TMAZ เท่านั้น แต่จะส่งผลทั่วทั้งบริเวณของเนื้อวัสดุเดิมทั้งหมด

3.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็ง

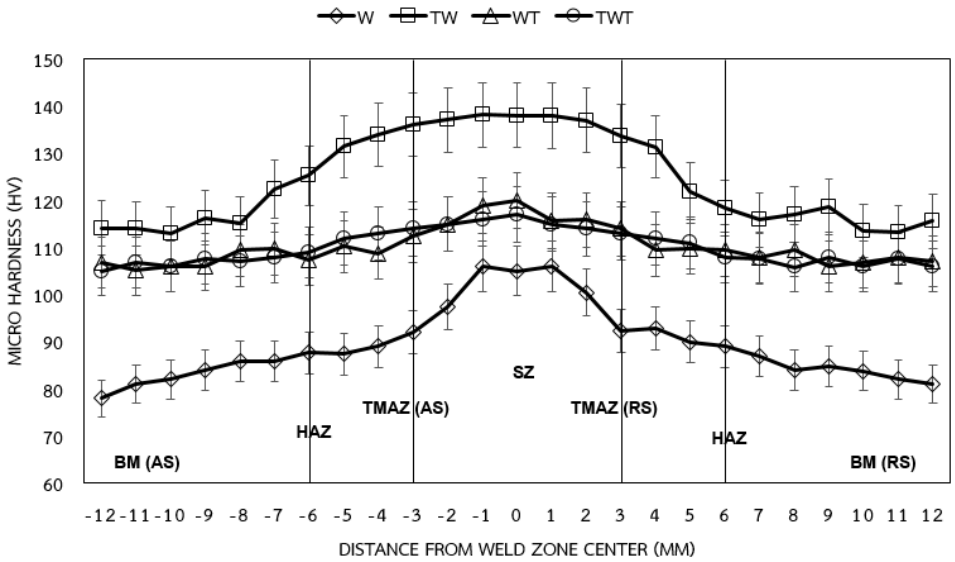
ในรอยเชื่อมทั้งหมดที่ผ่านกระบวนการ PWHT ยกเว้นรอยเชื่อม W ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าความแข็งเดิมของเนื้อวัสดุเดิม เมื่อสังเกตพบว่าค่าความแข็งของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนแสดงดังรูปที่ 9 บริเวณ TMAZ และ HAZ เริ่มมีค่ามากกว่าบริเวณเนื้อวัสดุเดิมและเพิ่มมากขึ้นเรื่อยจนถึงจุดสูงสุดในบริเวณ SZ ในทุกสภาวะการเชื่อม อย่างไรก็ตาม รอยเชื่อม W เป็นรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งในบริเวณ SZ, TMAZ และ HAZ น้อยที่สุดของการทดลอง เนื่องมาจากรอยเชื่อมไม่ได้ผ่านกระบวนการ PWHT ซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ [9] ต่อจากนั้นรอยเชื่อม WT และ TWT จะมีค่าเกาะกลุ่มกันตลอดรอยเชื่อม และเมื่อสังเกตของทั้ง 4 สภาวะการเชื่อม จะพบว่าในบริเวณ SZ จะมีค่าความแข็งมาก



รูปที่ 8 โครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่สภาวะทางความร้อนแตกต่างกัน ดังนี้ (A) W, (B) TW, (C) WT และ (D) TWT

ที่สุดในทุกบริเวณอันเนื่องมากจากการตกตะกอนของเฟส Al_2Cu ที่แทรกเข้าไปในอะลูมิเนียม α ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดจากกระบวน PWHT และการหมุนเสียดทานระหว่างหัวเชื่อมกับชิ้นงานทดลอง [25-26] ส่วนรอยเชื่อม TW มีค่าความแข็งทุกบริเวณมากกว่ารอยเชื่อมอื่น ๆ เนื่องจากกระบวนการ PWHT

ส่งผลให้มีค่าความแข็งของเนื้อวัสดุเพิ่มขึ้น [14] เมื่อเทียบกับรอยเชื่อม WT ค่าความแข็งของเนื้อวัสดุไม่เพิ่มขึ้นเนื่องจากไม่ได้ผ่านกระบวนการ PWHT และรอยเชื่อม TWT ค่าความแข็งของเนื้อวัสดุเพิ่มขึ้นแต่เนื่องจากเกิดรอยแตกร้าวในแนวเชื่อมซึ่งเป็นผลมาจากการทำกระบวนการ PWHT [10,14,22] และในบริเวณ HAZ, TMAZ และ SZ ก็มีค่าสูงขึ้นอีก เนื่องจากความร้อนจากการหมุนเสียดทานระหว่างหัวเชื่อมกับชิ้นงานทดลอง ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างให้ละเอียดมากขึ้น ทำให้ค่าความแข็งบริเวณดังกล่าวมีค่าเพิ่มมากกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม [8] ค่าความแข็งสูงสุดของการทดลองนี้อยู่ที่สภาวะการเชื่อม TW ในบริเวณ SZ มีค่า 138 Hv ส่วนค่าความแข็งต่ำสุดอยู่ที่ 78 Hv ที่สภาวะการเชื่อม W ในบริเวณ BM



รูปที่ 9 ค่าความแข็งของรอยเชื่อมในสภาวะต่าง ๆ

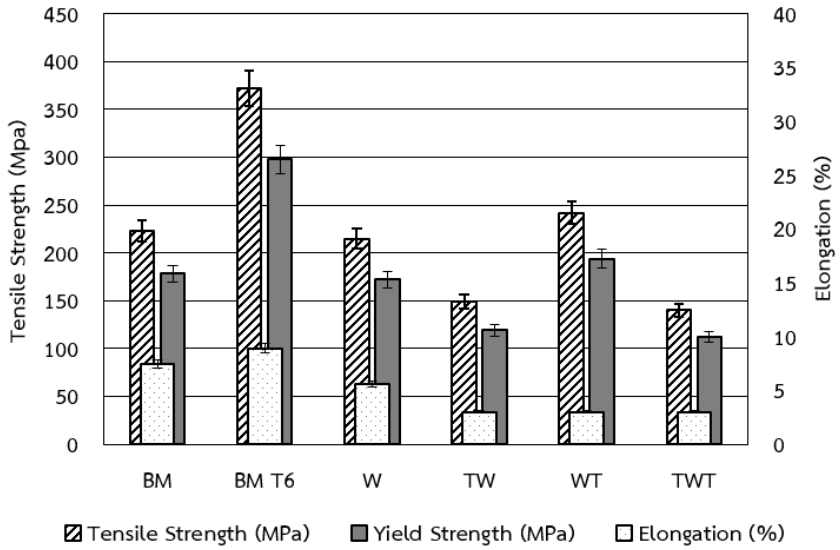
3.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึง

ตารางที่ 4 และรูปที่ 10 แสดงสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม จะเห็นได้ว่าสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมในแต่ละสภาวะมีค่าต่ำกว่าเนื้อวัสดุเดิม (base) ทั้งหมด ยกเว้นรอยเชื่อม WT แต่ถ้าเปรียบเทียบกับเนื้อวัสดุเดิมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (base T6) จะมีค่าต่ำกว่าทั้งหมด รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงดึงต่ำสุดคือ รอยเชื่อม TWT อันเนื่องมาจากวัสดุเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อนจะทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงดีขึ้น [14] เมื่อมาทำการเชื่อมด้วยสภาวะเดิมของอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ทำกระบวนการ PWHT ทำให้ความร้อนที่เกิดจากการหมุนเสียดทานระหว่างหัวเชื่อมกับชิ้นงานทดลองมีค่าไม่มากพอการเข้ากันของเนื้อวัสดุมีน้อย และเมื่อนำชิ้นงานทดลองไปทำกระยวนการ PWHT อีกครั้งทำให้วัสดุเกินขีดความสามารถจึงทำให้เกิดรอยแตกร้าวในรอยเชื่อมส่งผลให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำ [10,14,22] ในขณะเดียวกันรอยเชื่อม WT มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดจากการหมุนเสียดทานระหว่างหัวเชื่อมกับชิ้นงานทดลองมีค่าที่เหมาะสมเพราะเป็นผลมาจาก

การศึกษาของค่าการเชื่อมที่เหมาะสมที่สุด [18] บวกกับการทำกระบวนการ PWHT ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงดึงดีขึ้น [10,14,22] แต่ในทางกลับกันรอยเชื่อม TW วัสดุเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อนจะทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงดีขึ้น [14] เมื่อมาทำการเชื่อมด้วยสภาวะเดิมของอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ทำกระบวนการ PWHT ทำให้ความร้อนที่เกิดจากการหมุนเสียดทานระหว่างหัวเชื่อมกับชิ้นงานทดลองมีค่าไม่มากพอการเข้ากันของเนื้อวัสดุมีน้อยส่งผลให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำ

ตารางที่ 4 ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมในสภาวะต่าง ๆ

Sample	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Joint efficiency (Tensile strength) (%)	Joint efficiency (Elongation) (%)	Fracture locations of the joints
Base	223	178	7			-
Base T6	372	298	9			-
W	215	172	6	96	70	SZ on the AS
TW	149	119	3	67	40	The interface between the SZ and on the AS
WT	242	194	3	109	40	The interface between the SZ and on the AS
TWT	140	112	3	63	40	The interface between the SZ and on the AS



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของแต่ละรอยเชื่อม

รอยเชื่อมทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงค่าความเหนียวต่ำ ค่าร้อยละของการยืดตัวของรอยเชื่อมต่ำกว่าเนื้อวัสดุเดิมทั้งหมดยกเว้นรอยเชื่อม W โดยเฉพาะอย่างยิ่งรอยเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทำ PWHT อัตราการยืดตัวสูงสุดอยู่ที่ 3% เมื่อเทียบกับเนื้อวัสดุเดิมมีอัตราที่ 40 % ส่วนรอยเชื่อม W มีอัตราการยืดตัวมากสุดที่ 6 %

ประสิทธิภาพรอยเชื่อม คือ การเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของเนื้อวัสดุเดิมกับค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมทั้ง 4 สภาวะการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4 รอยเชื่อมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ WT อยู่ที่ 109 % แต่ในทางกลับกันอัตราการยืดตัวกลับมีค่าแค่ 3 % อันเนื่องมาจากกระบวนการทำ PWHT ทำให้วัสดุมีค่าความแข็งแรงดึงมากขึ้นแต่ไม่ได้ปรับปรุงในด้านความเหนียวจึงทำให้ค่าความเหนียวมีอัตราต่ำ [8] นอกจากนี้รอยเชื่อม W, TW และ TWT มีประสิทธิภาพรอยเชื่อมลดลง 96, 63 และ 67 % ตามลำดับ

4. สรุป

บนพื้นฐานของการวิจัยเชิงการทดลองของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนโดยที่การแตกต่างกันของกระบวนการทางความร้อนสำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง 2024 สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

โครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงของเกรนที่เห็นได้ชัดเจน มีอินเตอร์เฟซที่ชัดเจนระหว่าง SZ และ TMAZ โดยเฉพาะในบริเวณ SZ ไม่เห็นร่องรอยของโครงสร้างเกรนเดิมเนื้อวัสดุเดิม เกิดการแตกละเอียดของโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมและเฟส Eutectic ส่วนบริเวณ TMAZ เกรนเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิม เกิดการบิดเบี้ยวของเกรนที่มีผลมาจากการหมุนเชื่อมของหัวเชื่อม ส่วนรอยเชื่อม TWT จะปรากฏรอยแตกร้าว (crack) เป็นผลเนื่องมาจากอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อน

ค่าความแข็งของรอยเชื่อมในสภาวะ TW, WT และ TWT จะสูงกว่ารอยเชื่อมที่ไม่ผ่านกระบวนการ PWHT แสดงให้เห็นว่ารอยเชื่อมของกระบวนการ PWHT มีความแข็งมากขึ้น โดยเฉพาะในบริเวณ SZ ของทุกสภาวะ รอยเชื่อมจะมีค่าสูงกว่าเนื้อวัสดุเดิมซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากทั้งกระบวนการ PWHT และการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ซึ่งค่าความแข็งสูงสุดของการทดลองนี้อยู่ที่สภาวะการเชื่อม TW ในบริเวณ SZ มีค่า 138 Hv

ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อนำรอยเชื่อมไปทำกระบวนการ PWHT หลังการเชื่อม นั้นก็คือรอยเชื่อม WT ซึ่งเป็นรอยเชื่อมที่มีผลค่าความแข็งแรงดึงดีที่สุดของการทดลองนี้ คือ 242 MPa ส่วนรอยเชื่อมที่มีผลค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดคือ TWT มีค่าเท่ากับ 140 MPa ซึ่งเป็นผลมาจากการทำกระบวนการ PWHT ซ้ำสองครั้งทั้งก่อนและหลังการเชื่อมจึงทำให้เกิดรอยแตกร้าวในรอยเชื่อมและส่งผลต่อความแข็งแรงดึงในที่สุด

เปอร์เซ็นต์อัตราการยืดของรอยเชื่อมทั้งหมดที่ผ่านการทำกระบวนการ PWHT มีค่าต่ำกว่าการยืดตัวของเนื้อวัสดุเดิมโดยมีค่าเท่ากับ 3 % ในทุกสภาวะ ในขณะที่เปอร์เซ็นต์อัตราการยืดของรอยเชื่อมที่ไม่ทำกระบวนการ PWHT มีค่าใกล้เคียงกับเนื้อวัสดุเดิมที่ 6 %

ประสิทธิภาพรอยเชื่อมเมื่อเทียบกับเนื้อวัสดุเดิมจากรอยเชื่อมทั้ง 4 สภาวะการทดลอง รอยเชื่อมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ WT อยู่ที่ 109 นอกจากนี้รอยเชื่อม W, TW และ TWT มีประสิทธิภาพรอยเชื่อมลดลงมาตามลำดับดังนี้ 96, 63 และ 67 %

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2558

6. รายการอ้างอิง

[1] Dawes, C.J. and Thomas, W.M., 1996, Friction stir process welds aluminum alloys, Weld J. 75: 41-45.

[2] Flores, O.V., Kennedy, C., Murr, L.E., Brown, D., Pappu, S., Nowak, B.M. and McClure, J.C., 1998, Microstructural issues in a friction-stir-welded aluminum alloy, Scripta Mater. J. 38: 703-708.

[3] Murr, L.E., Liu, G. and McClure, J.C., 1998, A TEM study of precipitation and related microstructures in friction-stir-welded 6061 aluminum, J. Mater. Sci. 33: 1243-1251.

[4] Thomas, W.M. and Nicholas, E.D., 1997, Friction stir welding for the transportation industries, Mater. Des. 18: 269-273.

[5] Norman, AF., Brough, I. and Prangnell, PB., 2000, High resolution EBSD analysis of the grain structure in a AA2024 friction stir weld, Mater. Sci. Forum. 331-337: 1713-1718.

[6] Sato, Y.S. and Kokawa, H., 2001, Distribution of tensile property and microstructure in friction stir weld of 6063 aluminum, Metall Mater. Trans. 32A: 3023-3031.

[7] Scialpi, A., de Filippis, L.A.C. and Cavaliere, P., 2007, Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy, Mater. Des. 28: 1124-1129.

[8] Aydın, H., Bayram, A., Uguz, A. and Akay, S.K., 2009, Tensile properties of friction stir welded joints of 2024 aluminum alloys in different heat-treated state, Mater. Des. 30: 2211-2221.

[9] Xu, W., Liu, J., Luan, G. and Dong, C., 2009, Temperature evolution microstructure and mechanical properties of friction stir welded thick 2219-O aluminum alloy joints, Mater. Des. 30: 1886-1893.

[10] Elangovan, K. and Balaubramanian, V., 2008, Influence of post-weld heat treatment on tensile properties of friction stir welded AA6061 aluminum alloys joints, Mater. Charact. 59: 1168-1177.

[11] Liu, H.J., Fujii, H., Maeda, M. and Nogi, K., 2003, Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy, J. Mater. Process Technol. 142: 692-696.

[12] Lee, W.B., Yeon, Y.M. and Jung, S.B., 2003, The improvement of mechanical properties of friction-stir-welded A356 Al alloy, Mater. Sci. Eng. A 355: 154-159.

[13] Sullivan, A. and Robson, J.D., 2008, Microstructural properties of friction stir welded and post-weld heat-treated 7449

aluminium alloy thick plate, Mater. Sci. Eng. A 478: 351-360.

[14] Chen, C.Y., Liu, H.J. and Feng, J.C., 2006, Effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of 2219-O friction stir welded joints, J. Mater. Sci. 41: 297-299.

[15] Aydın, H., Bayrama, A. and Durgun, I., 2010, The effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of 2024-T4 friction stir-welded joints, Mater. Des. 31: 2568-2577.

[16] วรพงศ์ บุญช่วยแทน, จักรนรินทร์ ฉัตรทอง และชาตรี หอมเขียว, 2557, กระบวนการทางความร้อน T6 หลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 6061, ว.วิศวกรรมศาสตร์ ม.สยาม 15(1): 23-37.

[17] วรพงศ์ บุญช่วยแทน, รอมฎอน บูระพา และประภาศ เมืองจันทร์บุรี, 2558, สมบัติทางกลและการวิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยาของกระบวนการทางความร้อนก่อนและหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง 6061, น. 682-690, การประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 6, กรุงเทพฯ.

[18] วรพงศ์ บุญช่วยแทน, จักรนรินทร์ ฉัตรทอง และศุภชัย ชัยณรงค์, 2557, สภาวะที่เหมาะสมต่อการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง 2024, น. 348-356, การประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 5, กรุงเทพฯ.

[19] รอมฎอน บูระพา, รังสินี แคนยุกต์ และเจษฎา วรรณสินธ์, 2552, การพัฒนากระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัวสำหรับอะลูมิเนียมผสมเกรด A356, น. 549-554, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7, สงขลา.

[20] Pannaray, S., Wisutmethangoon, S., Plookphol, T. and Wannasin, J., 2011, Microstructure evolution during solution heat treatment of semisolid cast 2024 aluminum alloy, Advan. Mater. Res. 339: 714-717.

[21] Kim Y.G., Fujii H., Tsumura T., Komazaki T. and Nakata K., 2005, Three defect types in friction stir welding of aluminum die cating alloy, Mater. Sci. Eng. A 415: 250-254.

[22] วรพงค บุญชวยแทน, ธเนศ รัตนวิไล, ประภาศ เมืองจันทรบุรี และกนิษฐ ตะปะสา, 2554, การเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 356 หลอกึ่งของแข็งโดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในสภาพของกระบวนการทางความร่อน T6, วิศวกรรมสาร มข. 38(3): 219-232.

[23] Charit, I. and Mishra, R.S., 2008, Abnormal grain growth in friction stir processed alloys, Scr. Mater. 58: 367-371.

[24] Charit, I., Mishra, R.S. and Mahoney, M.W., 2002, Multi-sheet structures in 7475 aluminum by friction stir welding in concert with post-weld superplastic forming, Scr. Mater. 47: 631-636.

[25] Wang, J., Fu, R., Li, Y. and Zhang, J., 2014, Effects of deep cryogenic treatment and low-temperature aging on the mechanical properties of friction-stir-

welded joints of 2024-T351 aluminum alloy, Mater. Sci. Eng. A 609: 147-153.

[26] Nandan, R., DebRoy, T. and Bhadeshia, H.K.D.H., 2008, Recent advances in friction-stir welding-process weldment structure and properties, Prog. Mater. Sci. 53: 980-1023.