วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

บทความวิจัย

การศึกษาการตกตะกอนของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด 2024 ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

สิริพร ขันทองคำ[1*] สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์[2] อังคาร คำเรือน[3] และ ชนวีร์ ภักดีใหม่[1]

[1] สาขาวิศวกรรมการผลิตและระบบอัตโนมัติ, คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ
[2] สาขาวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติและหุ่นยนต์, สำนักวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
[3] สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: siriporn.kh@cpru.ac.th

วันที่รับบทความ: 24 ตุลาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 20 มกราคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 6 มีนาคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 24 เมษายน 2568

บทคัดย่อ: วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาการตกตะกอนของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด 2024 ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ ที่สภาวะการเชื่อมประกอบด้วย ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการวิจัยแสดงให้เห็นกลไกและผลของการตกตะกอนของงานเชื่อมในบริเวณต่าง ๆ ดังนี้ บริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) ประกอบด้วยตะกอนของเฟสจีพีโซน (GP Zone) และดิสโลเคชันเป็นส่วนใหญ่ และมี T-phase ($Al_{20}Cu_2Mn_3$) เล็กน้อย บริเวณพื้นที่กวน (SZ) ประกอบด้วยตะกอนของเฟส S′/ S (Al_2CuMg) เป็นส่วนใหญ่ และมี T-phase ขนาดใหญ่กว่าในบริเวณเนื้อโลหะเดิม และมีดิสโลเคชันกระจายในบริเวณอะลูมิเนียมเมตริกซ์ ซึ่งดิสโลเคชันเป็นเฟสที่ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของตะกอนเฟส S′/ S ในขณะที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (TMAZ) ด้านรีทรีตติงไซด์ (RS) ประกอบด้วยตะกอนของเฟส GP Zone และมีตะกอนเฟส S′/ S เกิดขึ้นเล็กน้อย ด้านแอดวานซิงไซด์ (AS) ประกอบด้วยตะกอนเฟส S′/ S T-phase และดิสโลเคชัน ซึ่งผลจากการตกตะกอนส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน โดยบริเวณรอยเชื่อมจะมีสมบัติทางกลที่ดีกว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน เนื่องจากลักษณะและปริมาณเฟสพรีซิพิเตตที่ต่างกัน

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานแบบกวน; พรีซิพิเตต; ดิสโลเคชัน; จีพีโซน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

บทความวิจัย

Study Precipitation of Semi-Solid Cast 2024 Aluminium Alloy for Friction Stir Welding

Siriporn Khanthongkum[1*], Somsak Siwadamrongpong[2], Angkarn Kamruan[3] and Chonnawee Pukdeema[1]

[1] Department of Manufacturing and Automation Engineering, Faculty of Arts and Science, Chaiyaphum Rajabhat University

[2] Department of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

[3] Department of Industrial Management Engineering, Faculty of Industrial Technology, Nakhonratchasima Rajabhat University

[*] Corresponding author, E-mail: siriporn.kh@cpru.ac.th

Received: 24 October 2024; Revised: 20 January 2025; Accepted: 6 March 2025
Online Published: 24 April 2025

Abstract: The purpose of this research was to study precipitation in friction stir welded semi solid 2024 aluminium alloy (SSM Al2024). The shape of stir head is cylindrical was employed with 3 parameters which composed of rotational speed (790 rpm), welding speed (22 and 36 mm/min). The results showed that mechanism and effect of precipitated on welded in various areas. The region of base metal (BM) was illustrated the dispersion of precipitate GP zone in matrix obviously and eutectic phase was found dispersedly at grain boundary of globular alpha-aluminium grain (α-Al) and rod-T phase dispersed within the Al matrix. The region stir zone consists of precipitate S´/ S (Al_2CuMg) and rod-T phase ($Al_{20}Cu_2Mn_3$). While, region TMAZ of the RS and AS was GP zone, precipitate S´/ S, rod-T phase and dislocation. Effect of precipitation on mechanical properties wherewith difference between structure and volume.

Keywords: Friction Stir Welding; Precipitate; Dislocation; GP Zone

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

บทความวิจัย

1. บทนำ

โลหะผสมอะลูมิเนียม เป็นวัสดุที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นอันดับสองรองจากเหล็ก เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่น เช่น น้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ แข็งแรงทนทาน ยืดตัวได้ง่าย ความเหนียวสูง ทนต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อน นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ และที่สำคัญคือไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ส่งผลให้โลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุหลักของการออกแบบเพื่อการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมโครงสร้าง อุตสาหกรรมชิ้นส่วนอากาศยาน อุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ รวมถึงชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เนื่องจากเป็นวัสดุที่ขึ้นรูปได้หลายวิธี ง่ายต่อการแปรรูป กัดแต่งได้ง่าย และในบางกระบวนการผลิตจำเป็นต้องมีการขึ้นรูปด้วยวิธีการเชื่อม ทั้งแบบหลอมละลาย (Fusion Welding) และการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid State Welding) ซึ่งกระบวนการเชื่อมที่ค่อนข้างใหม่และได้รับความนิยมในการเชื่อม คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding; FSW) เป็นการเชื่อมในสถานะของแข็งที่ใช้พลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานเชื่อมจะมีอุณหภูมิสูงและมีการหมุนตัวของหัวกวน เรียกบริเวณนี้ว่าบริเวณแนวเชื่อม (Stir Zone; SZ) โครงสร้างจุลภาคมีขนาดเล็กจากการตกผลึก มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากเนื้อโลหะเดิม (Base Metal; BM) อย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากการกระทำของหัวกวนในสภาวะพลาสติกอย่างรุนแรง และการกระจายความร้อนจากแรงเสียดทานในกระบวนการเชื่อม ทำให้แนวเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเนื่องจากมีการเปลี่ยนเฟส ส่งผลให้สมบัติทางกลเกิดการเปลี่ยนแปลง มีความแข็งแรงลดลงเนื่องจากผลกระทบทางด้านความร้อน (Heat Affected Zone; HAZ) เนื่องจากการกวนมีผลต่อเนื้อโลหะ และสมบัติทางกลของรอยเชื่อม

ดังนั้น หากต้องการควบคุมให้สมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในโลหะผสมอะลูมิเนียมมีสมบัติทางกลของบริเวณแนวเชื่อม (Mechanical Properties of Joint) ให้ใกล้เคียงกับเนื้อวัสดุเดิมมากที่สุดนั้น จึงจำเป็นต้องศึกษากลไกที่ทำให้เกิดการตกตะกอนของโครงสร้างจุลภาคในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แม้จะมีรายงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาปัจจัยหรือผลกระทบของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่มีผลต่อสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมอย่างกว้างขวาง แต่ลำดับการตกตะกอนของ SSM Al2024 ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ยังมีน้อยเนื่องจากความซับซ้อนของเฟส และการเชื่อม FSW มีการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่ซับซ้อน รวมถึงการกระจายและขนาดของเฟสในแต่ละบริเวณมีความแตกต่างกันอย่างมาก [1] งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการตกตะกอนของ SSM Al2024 หลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยมีปัจจัยที่ศึกษาคือ ความเร็วรอบในการหมุน ความเร็วในการเดินเชื่อม และรูปทรงของหัวกวน ต่อการเกิดการตกตะกอน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

2. วัสดุและอุปกรณ์ วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการวิจัย คือ โลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ เกรด Al2024 ชิ้นงานทดสอบหล่ออัดในสภาวะกึ่งของแข็งมีลักษณะเกรนแบบก้อนกลม (Globular Grain Structure) มีเฟสยูเทคติก (Eutectic Phase) อยู่บริเวณโดยรอบของขอบเกรน จากการขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งเริ่มจากการเกิดอนุภาคของของแข็งมีขนาดเล็กเกาะที่แท่งแกรไฟต์พรุน เมื่อเป่าแก๊สออกมาทางแท่งแกรไฟต์พรุนส่งผลให้อนุภาคของของแข็งดังกล่าวหลุดออกจากแท่งแกรไฟต์พรุนมาอยู่ในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวทำให้พื้นผิวบางส่วนของอนุภาคของของแข็งดังกล่าวนั้นมีการละลาย ส่งผลให้ขนาดอนุภาคของของแข็งมีความมนกลมขึ้นและมีรูปร่างของเกรนแบบ Equiaxed ทำให้เกรนมีลักษณะคล้ายเกรนก้อนกลม ส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน แสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 1 ตามลำดับ

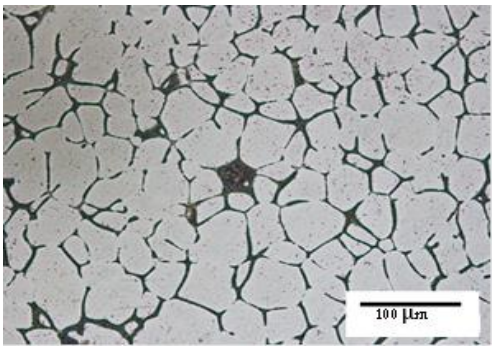
จากรูปที่ 1 พบว่าการเกิดนิวเคลียสของเฟส Al-α ขึ้นในอะลูมิเนียมเหลว เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลงทำให้เฟส Al-α โตขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic Temperature) ของเหลวจะแข็งตัวและฟอร์มเป็นเฟสยูเทคติกที่ประกอบไปด้วยเฟส Al_2Cu/Al_2CuMg

2.2 การเตรียมงานเชื่อม

ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนถูกเชื่อมด้วยเครื่องมิลลิง ยี่ห้อ Haven รุ่น XLW6332HIV โดยการนำชิ้นงานทดลองมาขึ้นรูปให้มีขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และความหนา 4 มิลลิเมตร ภายหลังขึ้นรูปนำชิ้นงาน 2 ชิ้น มาเชื่อม

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Al
5.09	1.67	0.63	0.4	0.33	0.04	Bal.



รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง Al2024 [2]

ด้วยวิธีการวางแบบต่อชนโดยติดตั้งบนอุปกรณ์จับยึด (Jig & Fixture) ที่สามารถวัดแรงกดในขณะทำการเชื่อมได้ มีการติดตั้งโหลดเซลล์ (Load Cell) เพื่อวัดแรงกด โดยแรงกดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อหัวกวนสัมผัสและเริ่มเดินแนวเชื่อมบนชิ้นงาน ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวของบ่าหัวกวนกับชิ้นงาน ทำให้เกิดความร้อนภายในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้วัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกและเกิดครีบด้านข้างของแนวเชื่อม

2.3 การทดลอง

การทดลองกำหนดให้มีพารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อม FSW เพื่อศึกษาการตกตะกอนของ SSM Al2024 เมื่อผ่านกระบวนการเชื่อม จำนวน 3 พารามิเตอร์ ประกอบด้วย ความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม และรูปทรงของหัวกวน ดังตารางที่ 2

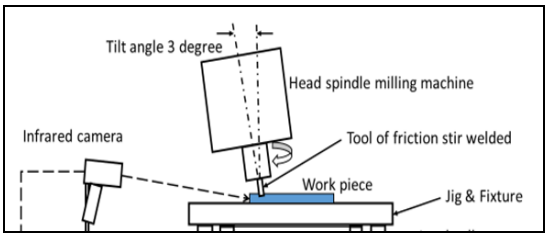
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อม FSW

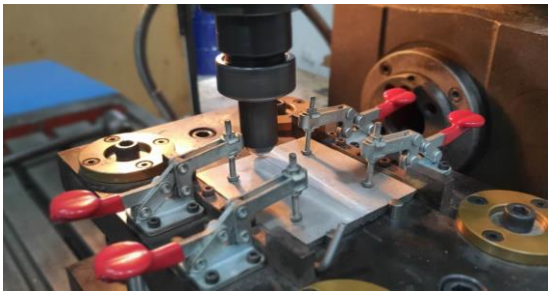
ปัจจัย	หน่วย	ระดับ
ความเร็วรอบในการหมุน	RPM	790
ความเร็วในการเดินเชื่อม	mm/min	22 36
รูปทรงหัวกวน	None	Cylinder
มุมเอียงหัวกวน	องศา	3

โดยในการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวน กำหนดให้หัวกวนเป็นทรงกระบอกเรียบ บ่าของหัวกวนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร และกำหนดหัวกวนให้มีขนาด 5 มิลลิเมตร มีมุมเอียงหัวกวน 3 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2

การทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะเชื่อมด้วยเครื่องกัดแนวตั้งเป็นเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน การปรับมุมเอียงเครื่องมือของหัวกดเชื่อมให้ตั้งมุมเครื่องมือเชื่อมเป็น 3 องศา กับชิ้นงานในแนวระนาบชิ้นงาน และทำการเชื่อมโดยกำหนดความเร็วในการหมุน 790 รอบต่อนาที และกำหนดความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที โดยการเชื่อมในขั้นตอนแรกเริ่มจากการเปิดเครื่องกัดให้เครื่องมือเชื่อมหมุนตามพารามิเตอร์ในการทดลองลอยอยู่เหนือชิ้นงาน จากนั้นหมุนโต๊ะงานขึ้นให้เครื่องมือเชื่อมกดลงไปในเนื้อวัสดุ จนกระทั่งปลายของหัวกวนถูกสอดไปในระยะความลึก จนสัมผัสกับบ่ากวนเป็นระยะเวลา 120 วินาที จากนั้นความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างเครื่องมือเชื่อมกับชิ้นงานจะทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวในสภาวะพลาสติก เมื่อครบเวลาที่กำหนดก็เคลื่อนที่โต๊ะงานของเครื่องกัดแบบอัตโนมัติตามความเร็วเดินเชื่อมในการทดลอง เมื่อสิ้นสุดแนวเชื่อมให้หยุดการ



รูปที่ 2 มุมเอียง 3 องศาของหัวกวน



รูปที่ 3 เริ่มต้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

เคลื่อนที่ของโต๊ะงานและให้หมุนหัวกวนแช่อยู่บริเวณปลายแนวเชื่อมประมาณ 20 วินาที จากนั้นเลื่อนโต๊ะงานเครื่องกัดลงเพื่อให้หัวกวนลอยขึ้นออกจากรอยเชื่อม และนำชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ดังรูปที่ 3

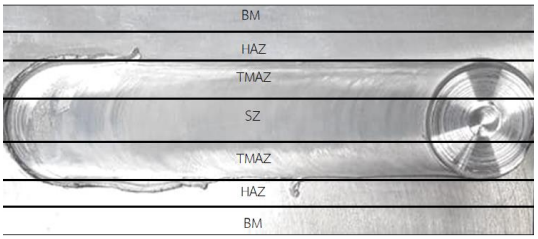
ในขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีการวัดแรงกด (Down Force) โดยติดตั้งโหลดเซลล์ (Load Cell) เข้ากับเครื่องกัดโลหะแบบแกนตั้งกึ่งอัตโนมัติในขณะทำการเชื่อม และบันทึกค่าตลอดการเชื่อม และติดตั้งกล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน (Thermal Imaging Infrared Camera; IR) ยี่ห้อ FLIR รุ่น E50 เพื่อวัดอุณหภูมิ ที่ความถี่ในการบันทึกข้อมูล 30 ภาพต่อวินาที (fps) กล้องจะถูกติดตั้งไว้บนแท่นโต๊ะเครื่องกัดโดยมีระยะห่างจากชิ้นงานทดสอบบนอุปกรณ์จับยึด 40 มิลลิเมตร

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

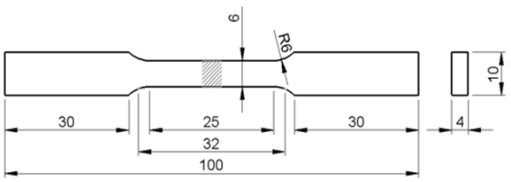
2.4 ตัวอย่างวิเคราะห์ทางโลหะวิทยา

ภายหลังการเชื่อมชิ้นงาน ชิ้นงานเชื่อมจะถูกนำไปตัดในแนวตั้งฉากกับแนวเชื่อม และนำไปขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 240, 360, 500, 800, 1000, 1200 และ 2400 และขัดผ้าสักหลาดโดยใช้ผงอะลูมิน่าขนาด 5 ไมครอน และนำไปถ่ายภาพโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) ยี่ห้อ Olympus รุ่น LEXT 3D OSL4000 เพื่อตรวจสอบรูปร่างรอยเชื่อมและศึกษาโครงสร้างจุลภาคของบริเวณพื้นที่ส่วนต่าง ๆ และในส่วนของการศึกษาการตกตะกอนของชิ้นงานทดสอบในกระบวนการเชื่อมนั้น นำชิ้นงานภายหลังการเชื่อมตัดในแนวขนานกับแนวการเชื่อม พื้นที่หน้าตัดขนาด 4 x 4 มิลลิเมตร ประกอบด้วยพื้นที่ต่างๆ ดังนี้ พื้นที่แนวเชื่อม (SZ) พื้นที่ได้รับผลกระทบความร้อนทางกล (TMAZ) พื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) และพื้นที่เนื้อโลหะเดิม (BM) ดังแสดงในรูปที่ 4

จากนั้น นำมากลึงให้เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาด 3 มิลลิเมตร และนำมาตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานละเอียดหนา 1 มิลลิเมตร และขัดด้วยกระดาษทรายและผงอะลูมิน่า จนกระทั่งเหลือความหนาที่ 50 ไมครอน ต่อด้วยการทำ Electro Polishing ด้วยเครื่อง Electro-polisher ยี่ห้อ Struer รุ่น Tenupol-3 โดยเตรียมสารละลายที่มีส่วนผสมของกรดไนตริก (HNO_3) 20% และเมทานอล (Methanol) 80% อุณหภูมิของสารละลายอยู่ระหว่าง -30 ถึง -20°C โดยการเติมไนโตรเจนเหลว และกำหนดให้ค่ากระแสไฟฟ้าเป็น 3-5 แอมแปร์ โวลต์มิเตอร์ 5 โวลต์ [3] ภายหลังการ Electro-Polishing นำไปดูโครงสร้างจุลภาคและการตกตะกอนของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM) รุ่น FE-TEM/STEM: Thermo Scientific TALOS F200X



รูปที่ 4 ตำแหน่งการตัดชิ้นงาน



รูปที่ 5 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง มาตรฐาน ASTM-E8

2.5 การทดสอบความต้านทานแรงดึง

ชิ้นงานที่นำไปทดสอบความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมถูกตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม โดยให้รอยเชื่อมอยู่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน ขนาดและรูปทรงของชิ้นทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM-E8 ดังรูปที่ 5

3. ผลการทดลอง

การศึกษาการตกตะกอนของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด 2024 โดยนำแนวเชื่อมที่ได้มาตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและตรวจสอบการตกตะกอนในบริเวณต่าง ๆ ของแนวเชื่อม และทดสอบสมบัติทางกลด้วยการทดสอบความต้านทานแรงดึง จากการทดลองแสดงได้ดังนี้

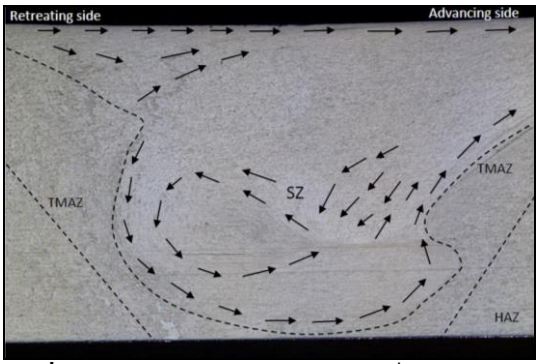
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

บทความวิจัย

3.1 โครงสร้างมหภาค

3.1.1 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที

จากการทดลองพบว่า ผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยหัวกวนทรงกระบอกเรียบ ลักษณะทั่วไปของผิวภายนอก ที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า ที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตร เห็นแนวการหมุนของหัวกวนชัดเจน ไม่มีรอยแยกของแนวเชื่อม เกิดครีบทางด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing Side; AS) มากกว่าด้านรีทรีตติงไซด์ (Retreating Side; RS) เนื่องจากลักษณะทิศทางการไหลของเนื้อวัสดุไหลวนหมุนไปตามหัวกวน การเดินเชื่อมทำให้เนื้อวัสดุไหลอัดไปทางด้าน AS ในขณะที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตร ผิวเรียบ ไม่มีรอยแยกของแนวเชื่อม และเกล็ดของผิวเชื่อมละเอียดมันวาวมากกว่าที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตร เนื่องจากความร้อนจากการหมุนของหัวกวนสูงแต่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมช้ากว่าทำให้ผิวมีความเรียบน้อยกว่า และบริเวณจุดเริ่มต้นจะเกิดครีบบริเวณขอบด้านข้างของแนวเชื่อมมาก เนื่องจากใช้เวลาในการกดและแช่หัวกวนเพื่อสร้างความร้อน และเมื่อหัวกวนเคลื่อนที่จะเกิดครีบทางด้าน AS มากกว่าด้าน RS เล็กน้อย เนื่องจากลักษณะทิศทางการไหลของเนื้อวัสดุไหลวนหมุนไปตามหัวกวน การเดินแนวเชื่อมทำให้เนื้อวัสดุไหลอัดไปทางด้าน AS [1]



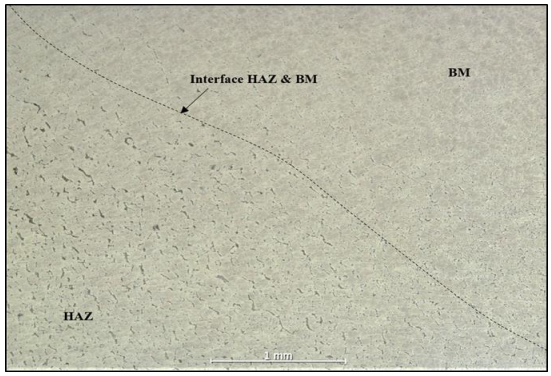
รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมในบริเวณต่าง ๆ ประกอบด้วย พื้นที่แนวเชื่อม พื้นที่ได้รับผลกระทบความร้อนทางกล และพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน พบว่า รูปร่างของรอยเชื่อมเป็นลักษณะรูปอ่าง [4] สามารถสังเกตทิศทางการไหลของเนื้อวัสดุเป็นชั้นคล้ายกับหัวหอม ไม่มีข้อบกพร่องของรอยเชื่อม เนื้อเชื่อมมีความสมบูรณ์ เกรนมีขาดเล็กละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 6

บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน เป็นพื้นที่อยู่ระหว่างผลกระทบจากความร้อนทางกล และบริเวณพื้นที่เนื้อโลหะเดิมพบว่า โครงสร้างมีขนาดเกรนที่โตกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยสังเกตได้จากบริเวณขอบเกรนจะมีขนาดที่หนาขึ้นจนเห็นความแตกต่างขอบเขตของพื้นที่ได้ชัดเจนระหว่างบริเวณเนื้อโลหะเดิม และบริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน ดังรูปที่ 7

ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

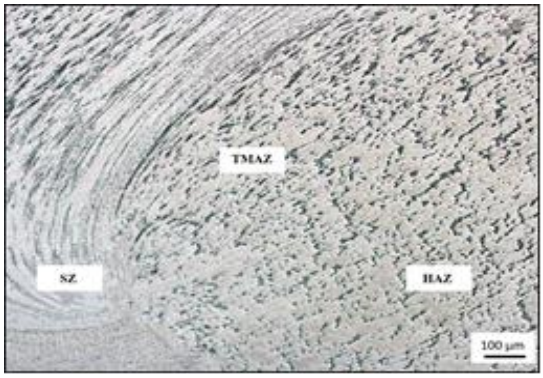
บทความวิจัย



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคบริเวณได้รับผลกระทบทางความร้อนกับบริเวณพื้นที่เนื้อโลหะเดิมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที

3.2 โครงสร้างทางโลหะวิทยา

โครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิม และบริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน เป็นพื้นที่ที่อยู่ระหว่างพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล และบริเวณพื้นที่เนื้อโลหะเดิม พบว่า บริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน โครงสร้างมีขนาดเกรนโตกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน บริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกลมีลักษณะโครงสร้างเป็น 2 ส่วน คือ ด้าน AS และด้าน RS โครงสร้างด้าน AS เกิดจากการกวนของหัวกวนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา โลหะที่อ่อนตัวไหลวนลู่ไปตามทิศทางการหมุนรอบหัวกวนทำให้เกิดโครงสร้างที่อยู่ระหว่างบริเวณพื้นที่กวน และพื้นที่รับผลกระทบทางความร้อน ขนาดเกรนประมาณ 50-60 ไมโครเมตร โดยลักษณะเกรนยาวรี ดังรูปที่ 8 และยืดตามทิศทางของหัวกวน โครงสร้างด้าน RS โครงสร้างมีลักษณะเป็นบริเวณแคบ ๆ



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณพื้นที่กระทบร้อนทางกลของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อนาที

โครงสร้างบริเวณพื้นที่แนวเชื่อม เป็นบริเวณที่หัวกวนสัมผัสโดยตรง โดยโครงสร้างตรงกลางแนวเชื่อมจะมีโครงสร้างที่มีเกรนเล็กละเอียดและจะค่อย ๆ หยาบขึ้นไปจนถึงด้าน RS บริเวณพื้นที่ถูกกวนพบว่าทิศทางการไหลของวัสดุที่เห็นได้ชัดเจนมีลักษณะคล้ายเป็นวงแหวนที่หมุนวนจากทางด้าน RS ไปด้าน AS ส่งผลให้รูปร่างของโครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อมมีความแตกต่างจากบริเวณเนื้อพื้นเดิมของวัสดุอย่างชัดเจน โดยเกรนมีขนาดที่เล็กละเอียดมาก เนื่องจากบริเวณที่ถูกกวนมีอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดการตกผลึกใหม่และการเสียรูปแบบพลาสติก ทำให้เกรนมีขนาดเล็กประมาณ 3 ถึง 5 ไมโครเมตร โครงสร้างบริเวณนี้คาดว่าประกอบไปด้วยอนุภาคทองแดงและแมกนีเซียมผสมอยู่ในอลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณพื้นที่ที่ถูกกวน เนื่องมาจากการเสียดทานระหว่างหัวกวนของเครื่องมือเชื่อมกับเนื้ออะลูมิเนียม ทำให้เกิดการแตกละเอียดของโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม และยูเทคติกเฟส ทำให้เนื้อที่ถูกกวนเกิดการประสานเข้ากันได้ดี บริเวณรอยเชื่อมและรูปร่างรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ ดังรูปที่ 9

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012



รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อนาที

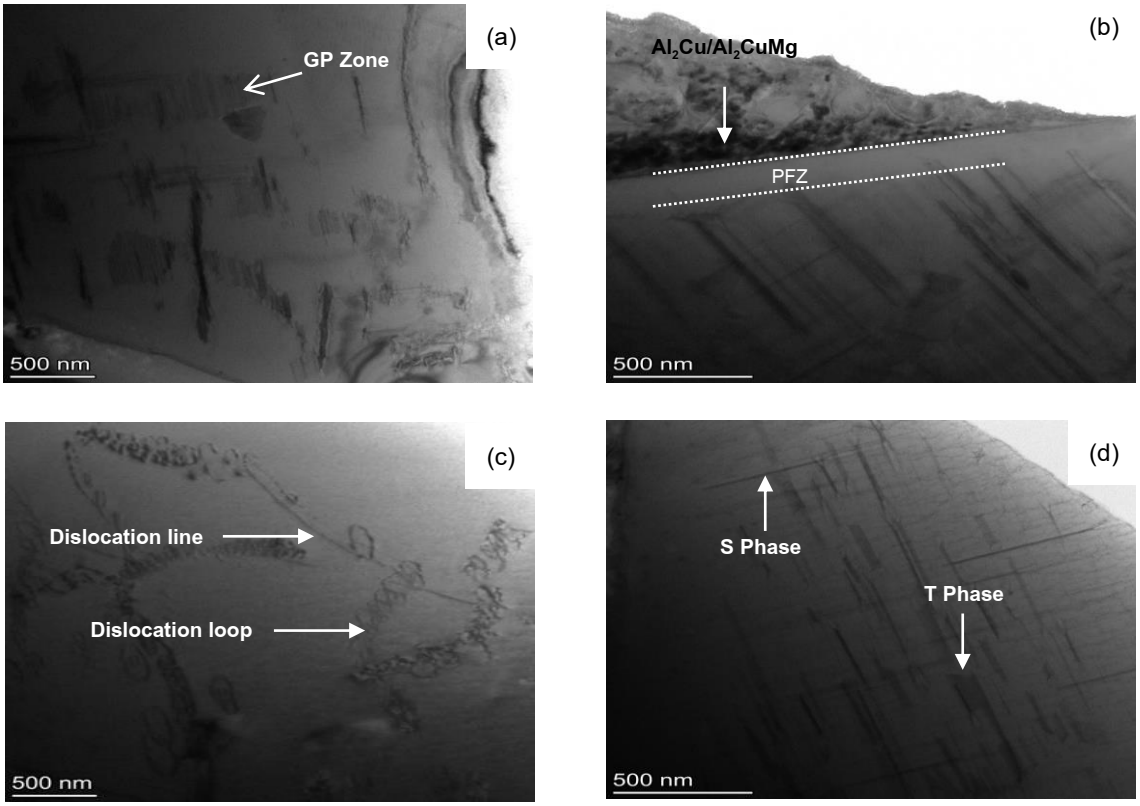
3.2.1 โครงสร้างจุลภาพของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

โครงสร้างจุลภาคของงานเชื่อม ที่ผ่านการเชื่อมด้วยหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ และมีความต้านทานแรงดึงสูงคือ ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อนำมาวิเคราะห์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ในบริเวณพื้นที่แนวเชื่อม บริเวณได้รับผลกระทบจากความร้อน บริเวณด้าน AS และบริเวณด้าน RS

บริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) จะประกอบด้วยพรีซิ-พิเตตที่เป็นเฟสจีพีโซน มีลักษณะเป็นแผ่น ความหนาประมาณ 4-6°A และกว้างประมาณ 80-100°A กระจายตัวในบริเวณที่เป็นเนื้ออะลูมิเนียมเมตริกซ์ (Al-Matrix) ดังแสดงในรูป 10(a) ในส่วนบริเวณขอบเกรนนั้นพบว่า มีเฟสยูเทคติกอยู่บริเวณโดยรอบของขอบเกรน [5] ซึ่งเฟสยูเทคติกประกอบไปด้วย Al_2Cu /Al_2CuMg และพบริเวณที่ไม่มีการตกตะกอนของพรีซิพิเตต (Precipitate Free Zone; PFZ) ซึ่งมีความกว้างประมาณ 150 นาโนเมตร จากระยะของขอบเกรน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Y.Q. Chen และคณะ [6] ดังแสดงในรูป 10(b) และพบว่ามีดิสโลเคชัน (Dislocations) กระจายตัวอยู่หนาแน่นในอะลูมิเนียมเมตริกซ์มีทั้งชนิดดิสโลเคชันที่เป็นเส้น (Dislocation Line) และดิสโลเคชันที่เป็นวง (Dislocation Loop) ดังแสดงในรูป 10(c) และมีพรีซิพิเตตเฟส S (Al_2CuMg) ลักษณะเป็นแผ่นบาง (Needle) โดยมีความยาวประมาณ 120 นาโนเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 นาโนเมตร และมีเฟส T-phase ($Al_{20}Cu_2Mn_3$) ลักษณะเป็นแท่งกระจายในเนื้ออะลูมิเนียมเมตริกซ์ ขนาดใหญ่มากสุดที่ 350 นาโน-เมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย I. Morozova และคณะ [1] ดังแสดงในรูป 10(d) บริเวณพื้นที่แนวเชื่อมเป็นบริเวณที่สัมผัสกับหัวกวนโดยตรง เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) จะเห็นทิศทางของการกวนอย่างชัดเจนจากการวางตัวของดิสโลเคชัน ดังแสดงในรูปที่ 11(a) และพบเฟสพรีซิพิเตต S′/ S กระจายบริเวณเนื้ออะลูมิเนียมเมตริกซ์ ความยาวประมาณ 50 – 250 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 11(b)โดยจากภาพพบว่ามีขนาดไม่ยาวมากเนื่องจากได้รับผลกระทบจากการกวนของหัวกวนโดยตรงทำให้เกิดการแตกหักของพรีซิพิเตต โดยเฟสพรีซิพิเตต S′/ S เกิดจากความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 350°C จากการเชื่อมกวน ทำให้เฟสจีพีโซนเกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟสพรีซิพิเตต S′/ S กระจายตัวหนาแน่น และเป็นบริเวณที่มีปริมาณของเฟสดังกล่าวมากที่สุด โดยมีลักษณะเริ่มเป็นระแนง [7] แต่เนื่องจากเวลาที่อุณหภูมิคงที่ไม่นานพอที่จะทำให้

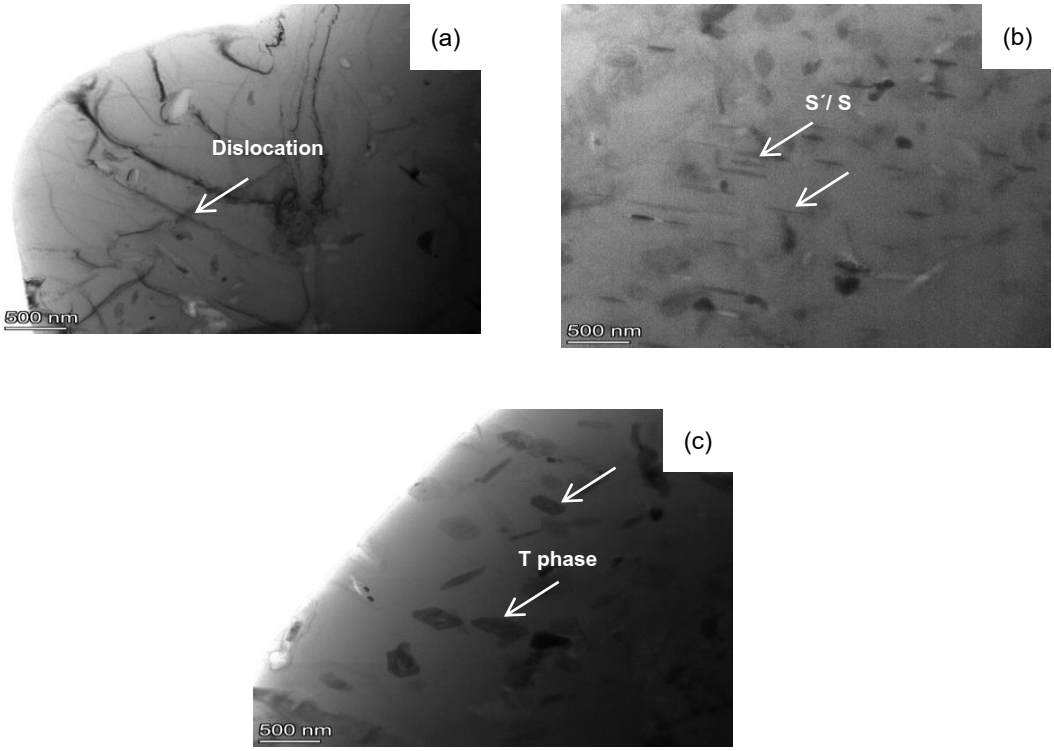
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

เกิดการเปลี่ยนเฟสได้ในปริมาณมาก และเฟสดังกล่าวสามารถเกิดพรีซิพิเตตย้อนกลับ (Re Precipitate) ไปเป็นเฟสจีพีโซนได้อีกครั้งเมื่ออยู่ในสภาวะบ่มแข็งธรรมชาติที่เวลาเหมาะสม (Natural Aging) [8] จึงยังคงพบพรีซิพิเตตเฟสจีพีโซนเหลืออยู่ และพบ T- phase กระจายตัวบริเวณขอบเกรน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Peng Li และคณะ [8] ดังแสดงในรูปที่ 11(c) ลักษณะเป็นแท่งขนาดใหญ่เนื่องจากการรวมตัวของส่วนผสมทางเคมีในวัสดุ และพรีซิพิเตตดังกล่าว มีสมบัติด้านความแข็ง และเปราะ รวมทั้งเป็นอุปสรรคในการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน



รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านฟังชันก์ Bright-field (BF) ของเนื้อโลหะเดิม (BM): (a) GP Zone (b) Grain Boundary and Eutectic phase (c) Dislocation (d) S-phase และ T-phase

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012



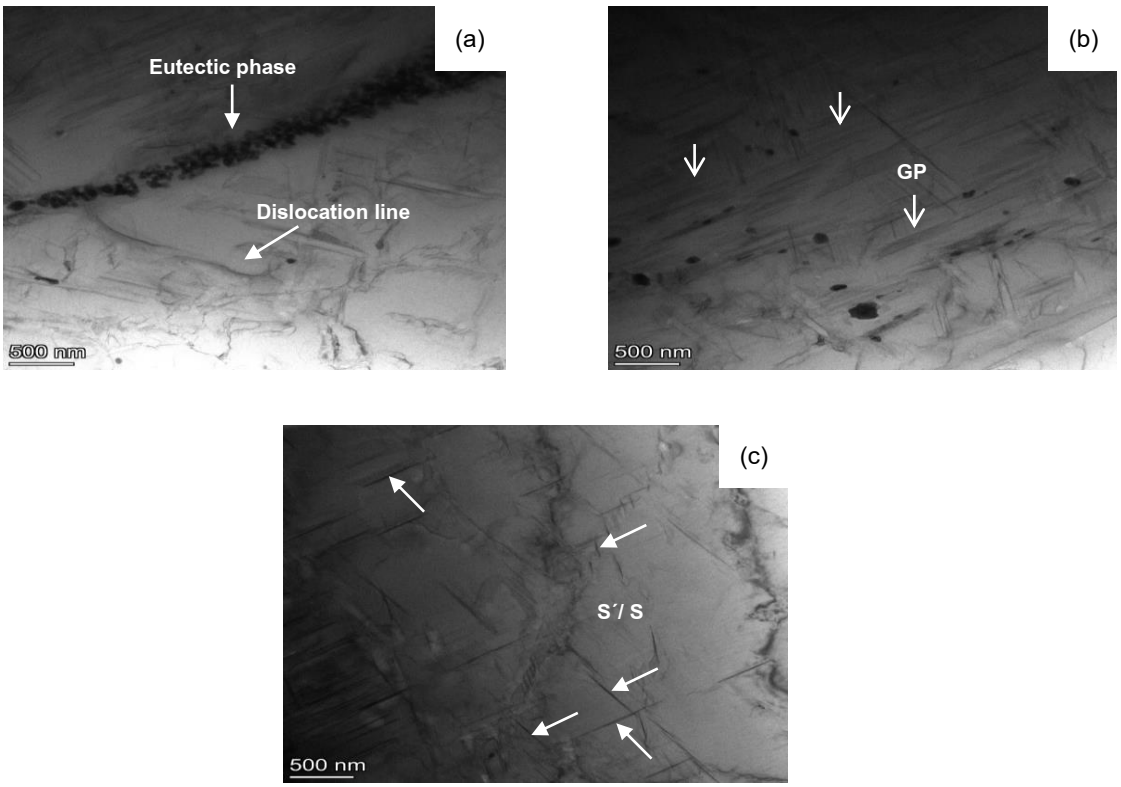
รูปที่ 11 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ฟังชันก์ Bright-field (BF) บริเวณรอยเชื่อม: (a) Dislocations (b) เฟสพรีซิพิเตต S´/ S และ (c) T-phase

บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อมเสียดทานด้าน RS เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบเฟสพรีซิพิเตตที่เป็นเฟสจีพีโซน มีลักษณะเป็นแผ่นวางตัวซ้อนกัน กระจายทั่วทั้งอะลูมิเนียมเมตริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 12(b) และมีเฟสพรีซิพิเตต S´/ S เกิดขึ้นเล็กน้อยแต่มีขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 12(c) เนื่องจากอุณหภูมิจากการเชื่อมกวนในบริเวณดังกล่าวนั้นไม่สูงพอที่จะทำให้มีการเปลี่ยนเฟสจากพรีซิพิเตตจีพีโซนเป็น S´ ได้มากพอ เนื่องจากไม่ได้รับความร้อนจากการกวนโดยตรง และบางส่วนมีการเปลี่ยนไปเป็นเฟสพรีซิพิเตตจีพีโซน ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกลบริเวณดังกล่าวลดลง [7] และพบดิสโลเคชันกระจายอยู่ในบริเวณอะลูมิเนียมเมตริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 12(a) และพบทั้งดิสโลเคชันที่เป็นเส้นและเป็นวง ในขณะที่บริเวณขอบเกรนจะพบยูเทคติกเฟส

บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อมเสียดทานด้าน AS เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบว่ามีการเกิดพรีซิพิเตต T-phase กระจายอยู่ในอะลูมิเนียมเมตริกซ์ดังแสดงในรูปที่ 13(a) และมี

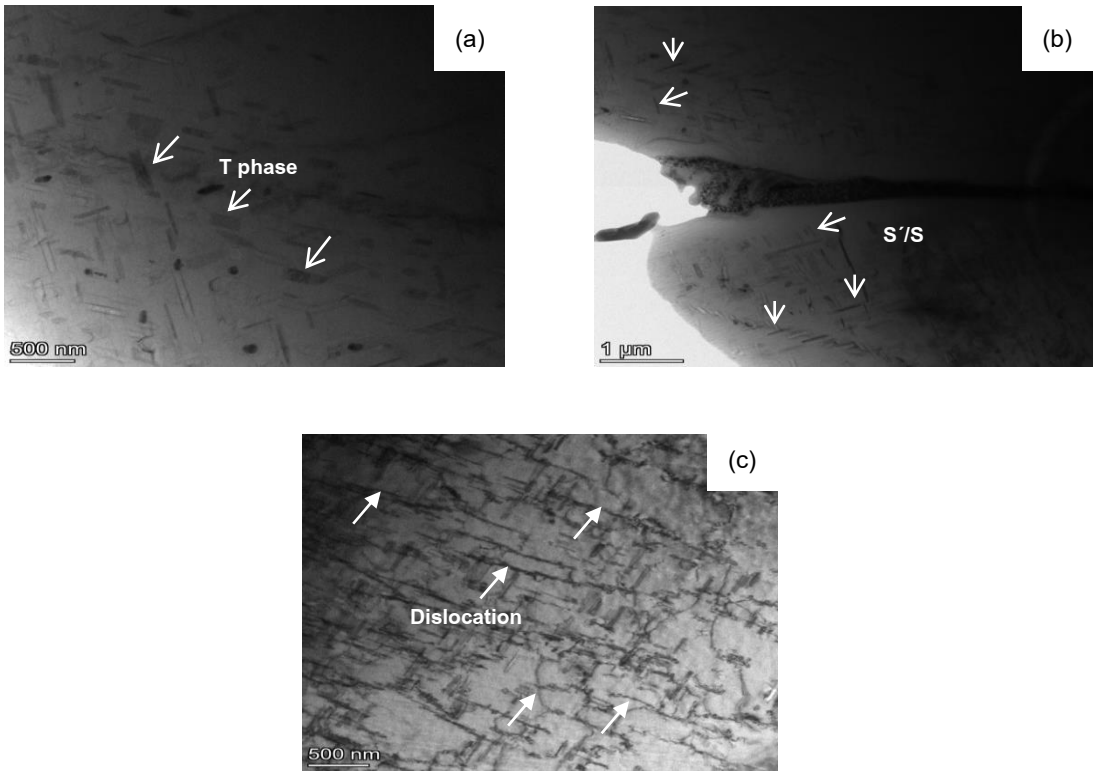
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

พรีซิพิเตตเฟส S′/ S ที่มีขนาดสั้นกว่าด้าน RS เนื่องจากทางด้าน AS ได้รับการกวนที่เป็นการกวนแบบทวนเข็มนาฬิกาทำให้อัดเนื้อวัสดุเข้าด้านในทำให้เกิดการแตกหักของพรีซิพิเตต โดยที่พรีซิพิเตตเฟส S′/ S กระจายตัวทั่วในบริเวณอะลูมิเนียมเมตริกซ์ และพบว่าบริเวณใกล้ขอบเกรนเกิด PFZ ดังแสดงในรูปที่ 13(b) ซึ่งมีการวางตัวเป็นระแนงและมีปริมาณที่มากกว่าทางด้าน RS อย่างชัดเจน และพบดิสโลเคชันที่ถูกขวางการเคลื่อนที่โดยพรีซิพิเตต เฟส S′/ S อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 13(c)



รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ฟังชันก์ Bright-field (BF) บริเวณได้รับผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อมเสียดทานด้าน RS:
(a) Dislocations (b) เฟสพรีซิพิเตตจีพีโซน และ (c) เฟสพรีซิพิเตต S′

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

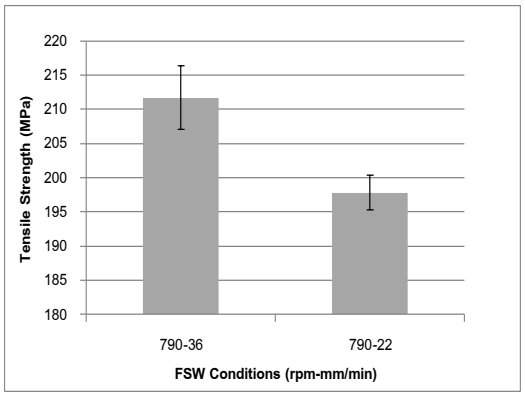


รูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ฟังชันก์ Bright-field (BF) บริเวณได้รับผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อมเสียดทานทางด้าน AS: (a) T-phase (b) เฟสพรีซิพิเตต S´/S และ (c) ดิสโลเคชัน

3.3 ความต้านทานแรงดึง

ในการทดสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM-E8 ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-50KNX จากการทดสอบพบว่า ที่ความเร็วเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเป็น 212 เมกะปาสคาล ดังแสดงในรูปที่ 14 และบริเวณที่เกิดการแตกหักนั้นชิ้นงานขาดออกจากกัน เกิดขึ้นบริเวณที่อยู่ถัดจากบริเวณรอยเชื่อมหรือบริเวณที่ถูกเครื่องมือกวนสัมผัสทางด้าน RS ซึ่งบริเวณนี้จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าบริเวณพื้นที่อื่น ๆ ในแนวเชื่อม [9] ซึ่งมีความสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคที่พบว่า บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนด้าน RS ประกอบด้วยตะกอนของเฟสจีพีโซน และมีตะกอนเฟส S´/ S ที่มีขนาดใหญ่และหยาบเกิดขึ้นเล็กน้อย จึงส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีความต้านทานแรงดึงน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ เนื่องจากมีเฟสที่เป็นอุปสรรคในการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันน้อยเมื่อมีแรงมากระทำ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012



รูปที่ 14 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง ความเร็วรอบการหมุน 790 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 22 และ 36 mm/min

4. บทสรุป

กลไกที่ทำให้เกิดความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน เกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม โดยการสร้างเฟสใหม่ คือ การตกตะกอนและการโตขึ้นของเฟสพรีซิพิเตตแบบต่าง ๆ รวมถึงการกระจายตัวของดิสโลเคชัน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน

เมื่อนำโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง SSM 2024 ไปเชื่อมเสียดทานแบบกวน และนำมาวิเคราะห์กลไกการเกิดความแข็งแรง ที่สภาวะการเชื่อมด้วยหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ในแต่ละบริเวณ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. บริเวณเนื้อโลหะเดิม พบตะกอนเฟสพรีซิพิเตตจีพีโซน ซึ่งเป็นเฟสที่ไม่เสถียรและเปลี่ยนเฟสเมื่อได้รับพลังงานความร้อน สามารถเปลี่ยนเป็นเฟสลำดับถัดไปได้ และจะส่งผลให้สมบัติทางกลเพิ่มขึ้น และพบดิสโลเคชันเป็นส่วนใหญ่กระจายในอะลูมิเนียมเมตริกซ์และมี T-phase เล็กน้อย

2. บริเวณพื้นที่แนวเชื่อมพบตะกอนเฟส S′/ S ที่เปลี่ยนโครงสร้างจากเฟสพรีซิพิเตตจีพีโซน และมีขนาดเล็กกระจายในอะลูมิเนียมเมตริกซ์ มีการวางตัวในสองทิศทางที่ตัดขวางกัน การกระจายตัวของเฟสดังกล่าวส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงสูงเนื่องจากเฟสดังกล่าวเป็นอุปสรรคในการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเมื่อมีแรงมากระทำ ขนาดและปริมาณของเฟสแปรผันตรงกับสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [1] และมี T-phase ขนาดใหญ่กว่าในบริเวณเนื้อโลหะเดิม

3. บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนด้าน RS พบตะกอนเฟสจีพีโซน และมีเฟส S′/ S เกิดขึ้นเล็กน้อย ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงบริเวณนี้น้อย เนื่องจากไม่มีอุปสรรคขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ด้าน AS พบตะกอนเฟส S′/ S กระจายตัวมากกว่า ประกอบกับมี T-phase ส่งผลให้มีอุปสรรคในการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันมากว่า

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และสำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ฝ่ายนักเรียนทุนรัฐบาลด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สนับสนุนเครื่องมือการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

6. เอกสารอ้างอิง

[1] I. Morozova, A. Królicka, A. Obrosov, Y. Yang, N. Doynov, S. Weib and V. Michailov, Precipitation in impulse friction stir welded 2024 aluminium alloy, Materials Science and Engineering: A, 2022, 852, 143617.

[2] S. Khantongkum, Influence of two-step aging parameters on mechanical properties of semi-solid cast 2024 aluminium alloy, Thesis, Suranaree University of Technology, Thailand, 2020.

[3] Y.C. Lin, J.-J. Liu and J.-N. Chen, Material flow tracking for various tool geometries during the friction stir spot welding process, Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22, 3674-3683.

[4] Z.Y. Ma, S.R. Sharma and S.R. Mishra, Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum, Materials Science and Engineering: A, 2006, 433, 269-278.

[5] D. Wang, L. Zhan, J. Zhong, Z. Tang, Q. Zeng and K. Gan, Stress-level dependency of creep aging behavior for friction stir welded Al-Cu alloy, Journal of Central South University, 2022, 29, 3030-3053.

[6] Y.Q. Chen, S.P. Pan, S.W. Tang, W.H. Liu, C.P. Tang and F.Y. Xu, Formation mechanisms and evolution of precipitate-free zone at grain boundaries in an Al-Cu-Mg-Mn alloy during homogenization, Journal of Materials Science, 2016, 51, 7780-7792.

[7] A.A. Eliseev, S.V. Fortuna and M.A. Khimich, Effect of ultrasonic impact on the microhardness and microstructure of friction stir welded aluminum alloy 2024, Russian Physics Journal, 2024, 67, 932-939.

[8] P. Li, S. Wang, Y. Xia, X. Hao, Z. Lei and H. Dong, Inhomogeneous microstructure and mechanical properties of rotary friction welded AA2024 joints, Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9, 5749-5760.

[9] Y. Hu, H. Liu, H. Fujii, K. Ushioda, H. Araki, K. Sugita and K. Liu, Vacancy-induced θ' precipitation during ultrasonic-affected friction stir welding of Al-Cu alloy, Journal of Materials Science, 2020, 55, 14626-14641.