



การปรับปรุงแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งด้วยวิธีการเชื่อมกึ่งแข็ง

Improvement Butt Weld of SSM aluminum alloys by Semi-solid State Joining

ภัสพล บิลทรอหิม¹, ประภาศ เมืองจันทร์บุรี¹, มุฮามัด เต๊ะยอ²

Patsapon Binrohimi¹, Prapas Muangjunburee¹, Muhamad Tehyo²

(Received: October 10, 2017; Revised: November 28, 2017; Accepted: January 6, 2018)

บทคัดย่อ

การปรับปรุงแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งด้วยวิธีการเชื่อมกึ่งแข็ง เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาโครงสร้างทางกายภาพมหภาค จุลภาค และสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งเกรด SSM356 ที่ผ่านการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็ง โดยให้ความร้อนบริเวณแนวต่อชนด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบขดลวด (Induction Heater) มีการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงระหว่าง 580-590°C ตลอดการเชื่อม เชื่อมด้วยส่วนไฟฟ้า ดอกสว่าน 4 mm ที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1,750 rpm มีความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 75 mm/min โดยทำการวิจัยที่ 3 สภาวะแตกต่างกันซึ่ง 2 สภาวะแรกจะเป็นการเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ โดยจะเชื่อมเพื่อหาทิศทางดอกสว่านที่ให้สมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมดีที่สุด ได้แก่ 1) การเชื่อมโดยใช้ดอกสว่านทิศทางหมุนตามเข็มนาฬิกา 2) การเชื่อมโดยใช้ดอกสว่านทิศทางหมุนทวนเข็มนาฬิกา จากผลการวิเคราะห์พบว่า สภาวะการเชื่อมโดยใช้ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาให้ผลโครงสร้างทางกายภาพ มหภาค จุลภาคและสมบัติเชิงกลให้ค่ามากกว่าเพียงเล็กน้อย จึงได้นำตัวแปรนั้นไปเชื่อมในสภาวะภายใต้แก๊สปกคลุม (แก๊สไนโตรเจน) อัตราการไหล 5 l/min อุณหภูมิแก๊ส 300°C นำผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพ มหภาค จุลภาคและสมบัติเชิงกลมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศปกติด้วยดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา พบว่า ชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุมจะให้ค่าสมบัติ (ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 121.7 MPa และมีค่าความแข็งเท่ากับ 63.9 Hv_(0.1)) สูงกว่าชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ (ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 111.2 MPa และมีค่าความแข็งเท่ากับ 63.2 Hv_(0.1))

คำสำคัญ: การเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็ง อะลูมิเนียมผสมเกรด SSM356 การเชื่อมด้วยส่วนไฟฟ้า

Abstract

This applied research aimed to improve butt weld of SSM aluminum alloy by using semisolid state joining. Physical properties were studied, including macro and micro structures, as well as mechanical properties of SSM 356 weld by semisolid state. Butt-joint of SSM356 was heated by induction heater. During welding, temperature was controlled in the range of 580-590°C. Samples were welded by portable drill tip stirring of 4 mm diameter. The stirring rate and welding speed were 1,750 rpm. and 75 mm./min, respectively. The welded specimens had 3 different conditions. Firstly, the 1st and 2nd conditions were welded under normal atmosphere in order to investigate which direction of drill could give the best mechanical properties of weld joints, clockwise and counter clockwise. Result showed that the clockwise direction provided slightly higher physical properties, macro/microstructure properties, and mechanical properties. Therefore the 3rd condition was welded under sledding gas (nitrogen gas) with the same welding parameter of clockwise direction. The gas flow rate and gas temperature were 5 L/min and 300°C, respectively. Then, the results with

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

¹ Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

² Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University

previous experiment were compared under normal atmospheres. The results showed that welded sample under nitrogen gas (Tensile strength 121.7 MPa and Hardness 63.9 Hv_(0.1)) gave better mechanical properties compared to the experiment under normal atmosphere (tensile strength 111.2 MPa and Hardness 63.2 Hv_(0.1)).

Keywords: Semi-solid state joining, SSM356, Joining by portable drill-tip

บทนำ

ในภาคอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ อาทิเช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องจักร นิยมใช้ชิ้นส่วนอะลูมิเนียม มากยิ่งขึ้น เนื่องจากอะลูมิเนียมมีสมบัติที่มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา ทนการกัดกร่อนได้ดี จึงทำให้อะลูมิเนียมเป็นที่สนใจ มากขึ้น อะลูมิเนียมผสมที่นิยมนำมาใช้จะเป็นอะลูมิเนียมรีดและอะลูมิเนียมหล่อ การหล่อขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมมีหลายหลากหลายกรรมวิธีโดยส่วนใหญ่จะให้โครงสร้างแบบกิ่งไม้ (Dendrite) ต่อมาได้มีการปรับปรุงการหล่ออะลูมิเนียมผสมให้มีโครงสร้างที่มีสมบัติดีขึ้นคือ กรรมวิธี GISS (Gas induce semi solid process) เป็นการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-solid metal หรือ SSM) ซึ่งการหล่อด้วยกรรมวิธีนี้จะให้โครงสร้างอะลูมิเนียมผสมเป็นแบบก้อนกลม (Spherical หรือ Globular grain) ทำให้อะลูมิเนียมมีสมบัติทางโครงสร้างที่ดีกว่าการหล่อที่ให้โครงสร้างแบบกิ่งไม้ (Wanasin & Thanabumrungskul, 2008, Wanasin, Burapa & Canyut, 2009)

การเชื่อมเป็นกรรมวิธีเชื่อมแซมชิ้นส่วนอะลูมิเนียมที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน การเชื่อมจะอาศัยความร้อนส่งผ่านไปยังชิ้นงานเพื่อให้เกิดการหลอมละลายติดกัน (Muangjunburee, 2012) ซึ่งเมื่อนำมาใช้กับอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็งกลับทำให้รูปแบบโครงสร้างของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็งเปลี่ยนไปจึงทำให้สมบัติต่างเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ได้มีการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งเพื่อคงสภาพรูปแบบโครงสร้างก่อนกลมของอะลูมิเนียมหล่อผสมไว้คือ การเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็ง ซึ่งกรรมวิธีการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งจะทำให้ความร้อนสู่ชิ้นงานให้อยู่ระหว่างช่วงอุณหภูมิของแข็งในชิ้นงานแต่ละชนิดเพื่อรักษาโครงสร้างก่อนกลมของวัสดุไว้

งานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการนำเอาอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็งเกรด SSM356 มาเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็ง โดยใช้หัวกวน (pin) ทำหน้าที่ในการกวนประสานชิ้นงานให้เป็นเนื้อเดียวกัน เชื่อมที่อุณหภูมิ 580-590°C (Petkhwon, Muangjunburee & Wannasin, 2014) ซึ่งการวิจัยพบว่าการเชื่อมหล่อผสมกึ่งแข็งเกรด SSM356 ในสถานะกึ่งของแข็งโดยใช้หัวกวนสามารถคงสภาพโครงสร้างที่เป็นก้อนกลมที่เป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ผ่านกรรมวิธีการหล่อแบบ GISS เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมในสภาวะที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 103.4 MPa (คิดเป็น 60.8% ของค่าโลหะเดิม) ซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าที่ยังไม่เป็นที่น่าพอใจจึงได้เกิดงานวิจัยชิ้นนี้ขึ้น

งานวิจัย การปรับปรุงการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็ง เป็นอีกหนึ่งงานวิจัยที่เกิดขึ้นเพื่อปรับปรุงแนวเชื่อมของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งแข็ง เป็นการเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กวนประสานเนื้อชิ้นงานจากหัวกวนเป็นส่วนไฟฟ้าและดอกสว่าน จากวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ส่วนไฟฟ้าและดอกสว่านยังคงรักษาโครงสร้างก่อนกลมไว้ได้ ทั้งยังยังลดปริมาณรูพรุนในแนวเชื่อมทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 111.2 MPa (คิดเป็น 67.9% จากโลหะเดิม) ซึ่งถือได้ว่าการปรับปรุงครั้งนี้ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น (Binrohim & Muangjunburee, 2015) ทางทีมวิจัยจึงได้นำค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลสูงที่สุดมาปรับปรุงอีกครั้งเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมให้สูงขึ้น

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อปรับปรุงแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งด้วยการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็ง
2. เพื่อหาสภาวะที่ให้ค่าแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งสูงที่สุด



ระเบียบวิธีวิจัย

การทดลองจะทำการทดลองทั้งหมด 3 สภาวะได้แก่ 1. การเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM356 ด้วยส่วนไฟฟ้าและดอกสว่านที่คั่นตามเข็มนาฬิกา 2. การเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM356 ด้วยส่วนไฟฟ้าและดอกสว่านที่คั่นทวนเข็มนาฬิกา 3. การเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมหล่อผสม SSM356 ด้วยส่วนไฟฟ้าและดอกสว่านที่คั่นตามเข็มนาฬิกา ภายใต้แก๊สปกคลุมซึ่งมีอุปกรณ์และขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

อะลูมิเนียมหล่อผสมเกรด SSM356 มีส่วนประกอบทางเคมีและสมบัติเชิงกลดังแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 โดยจะทำการปรับขนาดของอะลูมิเนียมหล่อผสมที่ผ่านการหล่อด้วยกรรมวิธี GISS จะทำโดยใช้เครื่องเลื่อยตัดให้มีขนาด 50x100x40 mm. จากนั้นนำมากัดด้วยเครื่องกัดให้มีขนาดเท่ากับ 50x100x4 mm. เพื่อให้ผิวหน้าของชิ้นงานเรียบมากที่สุด

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสมเกรด SSM356

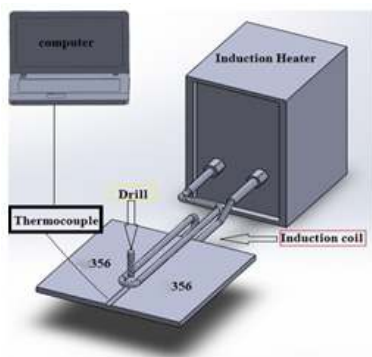
ส่วนประกอบ	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Al
SSM356	7.5	0.57	0.05	0.06	0.32	0.01	0.05	0.02	0.01	Balance

ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกลของ SSM356

ชิ้นงาน	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าความเค้นวิกฤติ (MPa)	ค่าความแข็ง Hv _(0.1)
SSM356	165.3	130	68

2. ขั้นตอนการเชื่อม

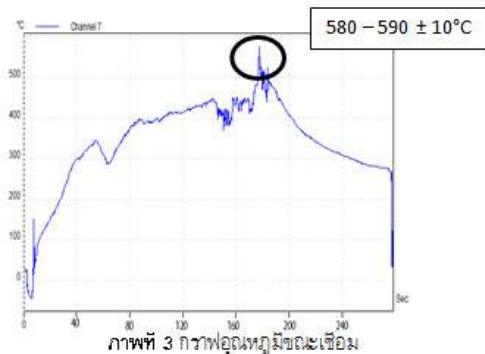
การเชื่อมอะลูมิเนียมเกรด SSM356 โดยการนำชิ้นงานมาเชื่อมต่อบนแบบชน ให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction heater) จนอุณหภูมิชิ้นงานสูงขึ้นถึง $560 \pm 10^{\circ}\text{C}$ จากนั้นให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 75 mm/min เมื่อชิ้นงานอุณหภูมิ 580-590 $^{\circ}\text{C}$ ทำการเชื่อมชิ้นงานด้วยส่วนไฟฟ้าและดอกสว่าน 4 mm ที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ดอกสว่านทำมุม 90 $^{\circ}$ กับชิ้นงานเชื่อม ตลอดการเชื่อมจะควบคุมอุณหภูมิด้วยการลดกระแสของเครื่องให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ ในส่วนการเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุมจะปล่อยแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 5 L/min และปล่อยแก๊สก่อนทำการปล่อยชิ้นงานเชื่อม 1 นาที หลังจากเชื่อมปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในบรรยากาศปกติ



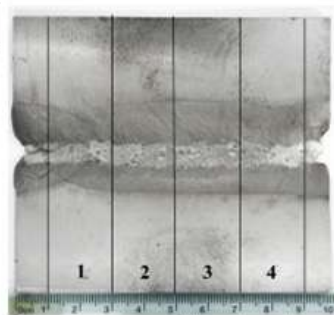
ภาพที่ 1 อุปกรณ์ในการเชื่อมสถานะกึ่งแข็ง



ภาพที่ 2 จัดอุปกรณ์ก่อนการเชื่อม



ภาพที่ 3 กราฟอุณหภูมิขณะเชื่อม



ภาพที่ 4 การตัดแบ่งชิ้นงานเชื่อมเพื่อทดสอบ

3. การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบ

1) โครงสร้างทางกายภาพ การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบโครงสร้างทางกายภาพจะนำชิ้นงานหลังจากการเชื่อม มาทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ก่อนจะสังเกตด้วยตาเปล่าถึงความสมบูรณ์ของชิ้นงานเชื่อม

2) โครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค นำชิ้นงานที่ผ่านการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพมาตัดแบ่ง เป็น 4 ส่วน ดังแสดงตามภาพที่ 4 ซึ่งการทดสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคจะนำชิ้นงานหมายเลข 1 และ 4 ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้น และช่วงสิ้นสุดของการเชื่อมเพื่อสังเกตความแตกต่าง ในการเตรียมชิ้นงานเมื่อตัดแบ่งนำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180-2,500 เปิดน้ำตลอดการขัด จากนั้นนำมาขัดด้วยผ้าสักหลาดด้วยอะลูมินา 5 0.3 และ 0.1 μm เมื่อเสร็จสิ้นการขัดชิ้นงานได้ชิ้นงานที่เรียบและมันเงาก็นำชิ้นงานไปจุ่มในสารละลาย Keller's reagent เป็นเวลา 40s แล้วนำชิ้นงานไปส่องดูลักษณะ โครงสร้างและขนาดเกรน

3) การหาขนาดเกรนและเปอร์เซ็นต์รูพรุน นำรูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของแต่ละสภาวะมาวิเคราะห์ขนาด เกรนและเปอร์เซ็นต์รูพรุนด้วยโปรแกรม Image J

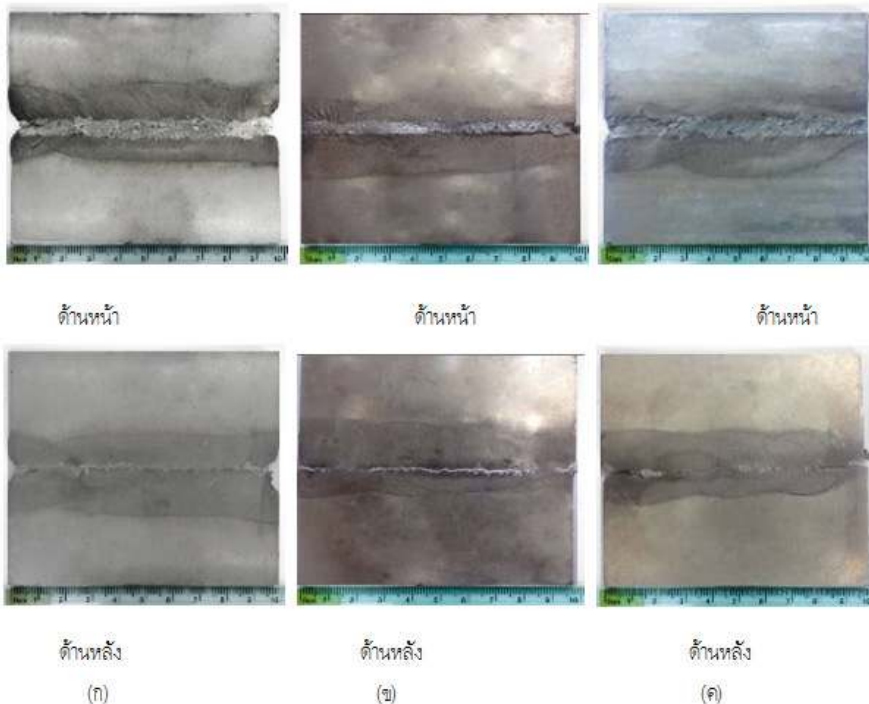
4) การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง นำชิ้นงานทดสอบหมายเลข 2 และ 3 แสดงในภาพที่ 4 มาทดสอบโดยใช้ เครื่องกัดแนวตั้ง ชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASEM-E8M และใช้ความเร็วดึงที่ 1.004 mm/min รวมสภาวะละ 6 ชิ้น

5) การทดสอบความแข็ง นำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค มาทดสอบ ความแข็ง โดยกดชิ้นงานที่แรง 100gf ใช้เวลากด 10s ระยะห่างแต่ละจุด 0.5 mm ทั้งหมด 40 จุด รวมสภาวะละ 1 ชิ้น

ผลการวิจัย

1. โครงสร้างทางกายภาพ

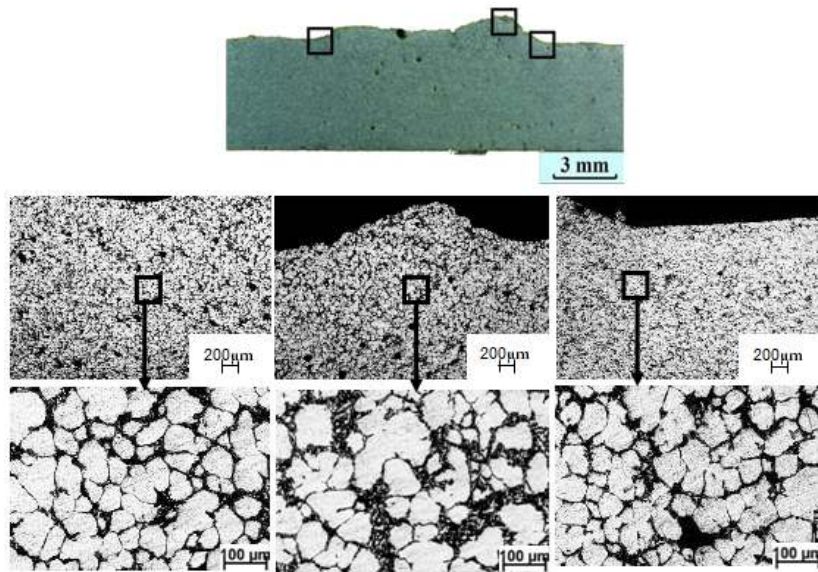
จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพพบว่า ชิ้นงานเชื่อมทุกสภาวะประสานติดกันดี ระหว่างชิ้นงานดอกสว่าน หมุนตามเข็มนาฬิกาเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติกับชิ้นงานดอกสว่านหมุนทวนเข็มนาฬิกาภายใต้บรรยากาศปกติ มีลักษณะ ที่ใกล้เคียงกันทั้งความกว้างของแนวเชื่อมและความกว้างของบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (Heat affected zone; HAZ) ดังแสดงในภาพที่ 5 (ก) และ 5 (ข) คือบริเวณที่เป็นรอยดำรอบแนวเชื่อม ในส่วนชิ้นงานภายใต้แก๊สปกคลุมพบว่า บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนมีความกว้างที่น้อยกว่าอีก 2 สภาวะ เนื่องจากการเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม อุณหภูมิ ของแก๊สมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานจึงทำให้ชิ้นงานเย็นตัวเร็วกว่าการเชื่อมในบรรยากาศปกติจึงทำให้มีบริเวณที่ได้รับผลกระทบทาง ความร้อนน้อยลงดังแสดงในภาพที่ 5 (ค)



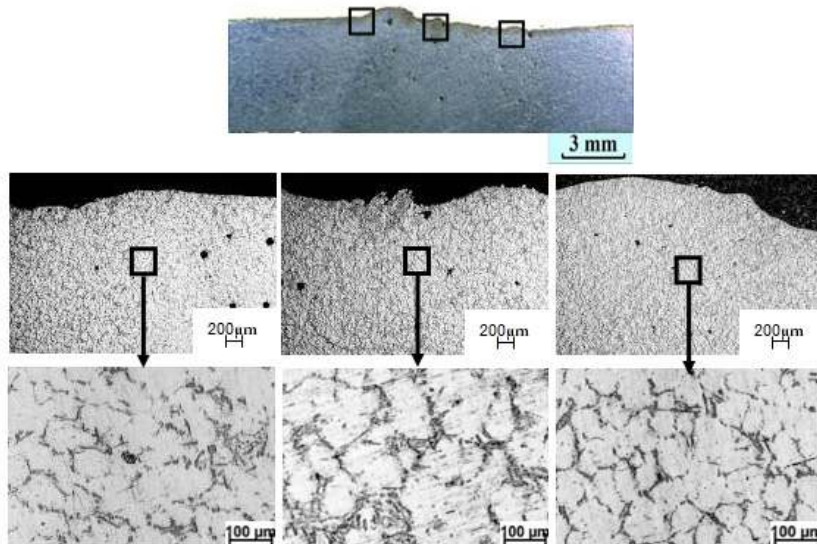
ภาพที่ 5 ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ (ก) สภาวะดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาภายใต้บรรยากาศปกติ (ข) สภาวะดอกสว่านหมุนทวนเข็มนาฬิกาภายใต้บรรยากาศปกติ (ค) สภาวะดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาภายใต้แก๊สปกคลุม

2. โครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

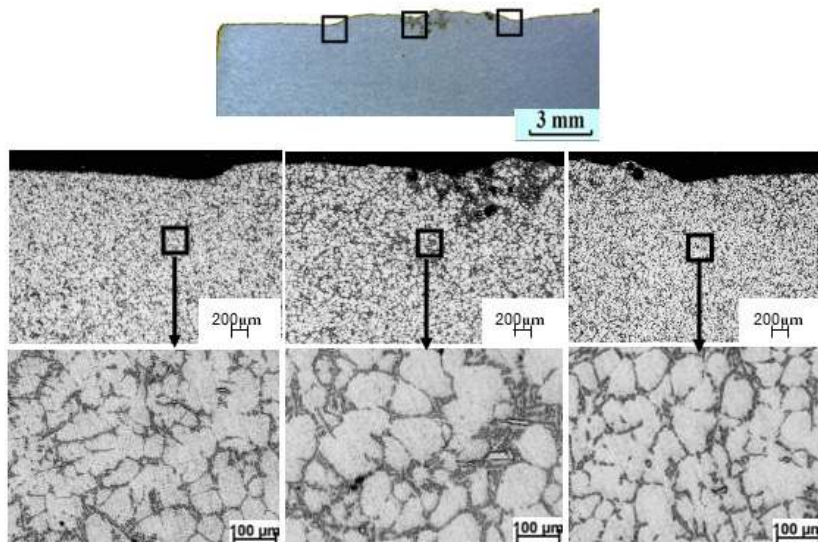
เลือกชิ้นงานที่มีแนวเชื่อมที่สมบูรณ์ที่สุด (รอยเชื่อมซึมลึกทั่วทั้งชิ้น แนวเชื่อมไม่มีรอยขาด) มาเปรียบเทียบกับโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานจะแบ่งชิ้นงานเป็น 3 บริเวณเพื่อวิเคราะห์ถึงอิทธิพลความเร็วรอบของดอกสว่านที่ส่งผลต่อแนวเชื่อมได้แก่ 1. บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Zone; WZ) 2. ด้านด้านการเคลื่อนที่ (Retreating side; RS) 3. ด้านเสริมการเคลื่อนที่ (Advancing side; AS) พบว่า ชิ้นงานดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาภายใต้แก๊สปกคลุมสังเกตเห็นรูพรุน (จุดสีดำในแนวเชื่อม) ได้ชัดเจนที่บริเวณผิวบนของแนวเชื่อมแสดงในภาพที่ 8 ซึ่งแตกต่างจากอีก 2 สภาวะที่สามารถสังเกตเห็นรูพรุนได้ชัดเจนในบริเวณเนื้อเชื่อม เนื่องด้วยการเชื่อมในสภาวะใต้แก๊สปกคลุม แก๊สจะทำหน้าที่ป้องกันอากาศจากภายนอกไหลเข้าสู่เนื้อเชื่อมได้ดีกว่าการเชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ (How, Mutharasan & Kazal., 1995) จากการคำนวณหาจำนวนรูพรุนได้ค่าตามตารางที่ 3 พบว่าดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาภายใต้แก๊สปกคลุมมีจำนวนรูพรุนน้อยที่สุดสอดคล้องกับภาพโครงสร้างจุลภาคที่พบรูพรุนเฉพาะผิวบนแนวเชื่อมเท่านั้นและบริเวณเนื้อเชื่อมเป็นบริเวณที่ถูกกว่นหรือเนื้อเชื่อมจะมีรูพรุนมากที่สุดทั้งนี้ด้านด้านการเคลื่อนที่ที่มีรูพรุนมากกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่ที่เล็กน้อยซึ่งเกิดจากอิทธิพลของดอกสว่านที่เป็นลักษณะเกลียวทำให้ด้านด้านการเคลื่อนที่เกิดรอยแยกมากกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่ในขณะที่เชื่อมเป็นเหตุให้อากาศสามารถแทรกซึมเข้าไปได้ (Threadgill, Leonard, Shercliff & Withers., 2009) ในส่วนของโครงสร้างจุลภาคพบว่าโครงสร้างยังคงลักษณะก่อนกลมและมีขนาดเกรน (α -Al) แสดงในตารางที่ 4 ซึ่งขนาดเกรนมีขนาดใกล้เคียงกันทั้งหมดเป็นผลมาจากในขณะเชื่อมใช้ตัวแปรในการเชื่อมที่เหมือนกันทั้งความเร็วรอบดอกสว่าน (rpm) ความเร็วเดินแนวเชื่อม (mm/min) และอุณหภูมิในขณะการเชื่อม ($^{\circ}\text{C}$)



ภาพที่ 6 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมตอกส่วกันตามเข็มนาฬิกาภายใต้บรรยากาศปกติ โดย (รูปซ้าย) ด้านด้านการเคลื่อนที่ (รูปกลาง) บริเวณแนวเชื่อม (รูปขวา) ด้านเสริมการเคลื่อนที่



ภาพที่ 7 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมตอกส่วกันตามเข็มนาฬิกาภายใต้บรรยากาศปกติ โดย (รูปซ้าย) ด้านด้านการเคลื่อนที่ (รูปกลาง) บริเวณแนวเชื่อม (รูปขวา) ด้านเสริมการเคลื่อนที่



ภาพที่ 8 โค้งส่วนหมอกและจุดของชิ้นงานเชื่อมดอกส่วนหมอกตามเข็มนาฬิกาภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) โดย (รูปซ้าย) ด้านต้นการเคลื่อนที่ (รูปกลาง) บริเวณแนวเชื่อม (รูปขวา) ด้านเสริมการเคลื่อนที่

ตารางที่ 3 จำนวนรูพรุนของชิ้นงานแต่ละสภาวะ

ความเร็วรอบ ดอกส่วน (rpm)	ทิศทางการหมุนดอก ส่วน	บรรยากาศปกคลุม	จำนวนรูพรุนด้านต้น การเคลื่อนที่ (%)	จำนวนรูพรุนบริเวณ เนื้อเชื่อม (%)	จำนวนรูพรุนด้านเสริม การเคลื่อนที่ (%)
1,750	หมุนตามเข็มนาฬิกา	ภายใต้บรรยากาศ	2.5 ± 0.5	3.0 ± 0.5	2.3 ± 0.5
	หมุนทวนเข็มนาฬิกา	ปกติ	2.7 ± 0.5	3.1 ± 0.5	2.5 ± 0.5
	หมุนตามเข็มนาฬิกา	ภายใต้แก๊สปกคลุม	1.3 ± 0.5	1.3 ± 0.5	0.5 ± 0.5

ตารางที่ 4 ขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานแต่ละสภาวะ

ความเร็วรอบ ดอกส่วน (rpm)	ทิศทางการหมุนดอก ส่วน	บรรยากาศปกคลุม	ขนาดเกรนด้านต้น การเคลื่อนที่ (μm)	ขนาดเกรนบริเวณ เนื้อเชื่อม (μm)	ขนาดเกรนด้านเสริม การเคลื่อนที่ (μm)
1,750	หมุนตามเข็มนาฬิกา	ภายใต้บรรยากาศ	60 ± 2	56 ± 2	63 ± 2
	หมุนทวนเข็มนาฬิกา	ปกติ	66 ± 2	63 ± 2	65 ± 2
	หมุนตามเข็มนาฬิกา	ภายใต้แก๊สปกคลุม	62 ± 2	60 ± 2	61 ± 2

3. สมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม

1) ค่าความแข็งแรงดึง จากตารางที่ 5 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมพบว่า ชิ้นงานเชื่อมดอกส่วนหมอกตามเข็มนาฬิกาภายใต้แก๊สปกคลุมมีค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมสูงที่สุดสอดคล้องกับผลจำนวนรูพรุนที่พบรูพรุนในเนื้อเชื่อมน้อย ในส่วนของชิ้นงานดอกส่วนเชื่อมหมอกตามเข็มนาฬิกาและหมอกทวนเข็มนาฬิกาภายใต้บรรยากาศปกติมีค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมที่ใกล้เคียงกันเป็นไปตามผลการวิเคราะห์จำนวนรูพรุนที่มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าจุดดรากรและ

ระยะยึดตัวของแนวเชื่อมก็เป็นไปตามค่าความแข็งแรงดึง ขึ้นงานทดสอบทุกชิ้นของทุกสภาวะขาด้านด้านเคลื่อนที่ทั้งหมด ซึ่งในผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า ขึ้นงานด้านด้านการเคลื่อนที่มีจำนวนรุกรานที่มากที่สุด จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของด้านด้านความเคลื่อนที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของเกลียวในดอกสว่านที่สามารถสร้างรอยแยกระหว่างบ่อน้ำโลหะและดอกสว่านในขณะที่เชื่อมตรงด้านด้านเคลื่อนที่ได้มากกว่าบริเวณอื่น (Threadgill et al., 2009) ทำให้เกิดจุดบกพร่องได้ง่ายขึ้นจึงเป็นผลให้ด้านด้านการเคลื่อนที่มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำ

ตารางที่ 5 แสดงสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม

ความเร็วรอบ ดอกสว่าน (rpm)	ทิศทางการหมุน ดอกสว่าน	บรรยากาศ ปกคลุม	ค่าเฉลี่ยความ แข็งแรงดึง (MPa)	ค่าเฉลี่ยจุดคราก (MPa)	ระยะยึดของแนว เชื่อม (%)	ค่าเฉลี่ยความ แข็ง (Hv0.1)
1,750	หมุนตามเข็มนาฬิกา	ภายใต้	111.2	77.5	2.6	63.2
	หมุนทวนเข็มนาฬิกา	บรรยากาศปกติ	109.8	77.3	2.5	62.7
	หมุนตามเข็มนาฬิกา	ภายใต้แก๊ส ปกคลุม	121.7	91.8	3.6	64.0



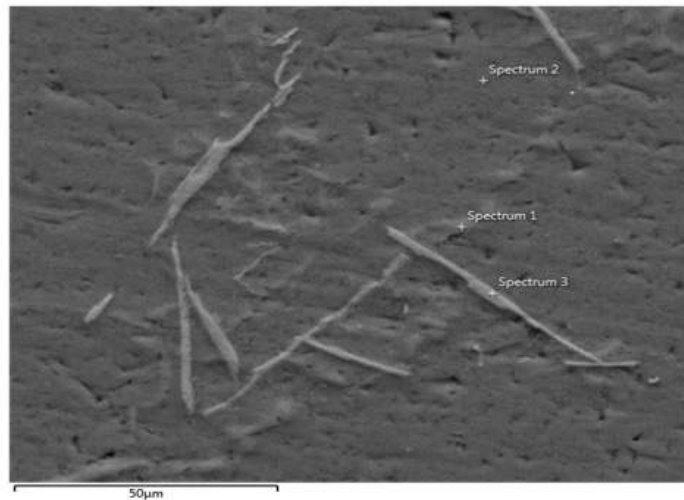
ภาพที่ 9 ค่าความแข็งแนวเชื่อมของชิ้นงานเชื่อม

2) ค่าความแข็งแนวเชื่อม จากภาพที่ 9 แสดงค่าความแข็งแนวเชื่อมของชิ้นงานเชื่อมดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา ดอกสว่านหมุนทวนเข็มนาฬิกา ภายใต้บรรยากาศปกติและ ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกาภายใต้แก๊สปกคลุมมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก (ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงแนวเชื่อมเท่ากับ 63.2 62.7 64.0 Hv0.1) เนื่องจากชิ้นงานเชื่อมของทั้ง 3 สภาวะมีขนาดเกรนที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งการที่ขนาดเกรนใกล้เคียงกันทำให้ดิสโลเคชันมีการเคลื่อนที่ระหว่างการดที่ใกล้เคียงกัน (Jung, Lee & Park., 2013) ทั้งนี้ยังพบว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (Heat affected zone; HAZ) ทั้ง 2 ด้าน (ชิ้นงานด้านด้านการเคลื่อนที่และด้านเสริมการเคลื่อนที่) มีค่าความแข็งที่น้อยกว่าบริเวณเนื้อเชื่อม เนื่องจากความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเส้นโซลัสของเฟส θ ของอะลูมิเนียม SSM356 จึงทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟส θ เข้าสู่น้ำโลหะเดิมจึงทำให้



บริเวณนี้มีขนาดเกรนที่โตกว่าบริเวณที่ถูกกวาน เมื่อมีขนาดเกรนที่โตขึ้น (Muangjunburee, 2012, Sikon, 2008, Saisang, Makklang & Kongtrakul, 2011)

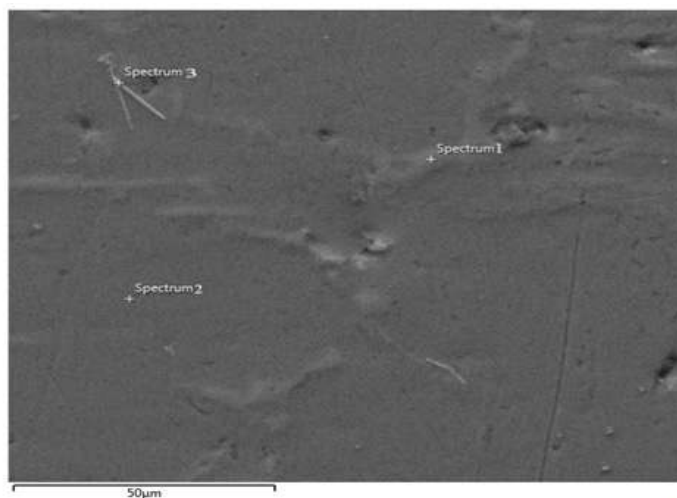
3) โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดเป็นการใช้สัญญาณแบบอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons, BSE) และใช้สัญญาณแบบเอกซเรย์ (X-Ray) เป็นสัญญาณที่ใช้เทคนิค EDX ซึ่งจะมีการเตรียมชิ้นงานที่เหมือนกับการเตรียมชิ้นงานเพื่อดูโครงสร้างจุลภาค โดยใช้กำลังขยาย 1000 เท่า โดยทำการถ่าย 2 ชิ้นงานนั้นคือ ชิ้นงานเชื่อมที่ความเร็วรอบดอกสว่าน 1750 rpm ภายใต้บรรยากาศปกติและภายใต้แก๊สปกคลุม ตรวจสอบบริเวณเนื้อเชื่อม เพื่อความแตกต่างของลักษณะภายในเนื้อเชื่อมของทั้งสองสภาวะ โดยใช้สัญญาณแบบกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons, BSE) เพื่อดูลักษณะภายใน ซึ่งพื้นที่ที่มีสีสว่างจะเป็น "ธาตุหนัก" คือธาตุที่มีเลขอะตอมมาก ($Fe = 26$, $Mn = 25$) และในพื้นที่ที่มีสีเข้มจะเป็น "ธาตุเบา" คือธาตุที่มีเลขอะตอมน้อย ($Al = 13$, $Si = 14$) รวมอยู่ในนั้นด้วย หลังจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณธาตุในแต่ละจุดด้วยวิธี Point Scan โดยใช้สัญญาณแบบเอกซเรย์ (X-Ray) หรือเทคนิค EDX โดยทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 จุดด้วยกัน ซึ่งผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 10 และ 11 ผลของปริมาณธาตุแสดงในตารางที่ 6 และตารางที่ 7 โดยพบว่าที่จุดที่ 1 หรือ Spectrum 1 เป็นตำแหน่งระหว่างเกรน คือขอบเกรนหรือ เฟสยูเทกติกซิลิกอน (Si Eutectic phase) โดยตำแหน่งนี้มีธาตุซิลิกอนค่อนข้างสูงซึ่งมีมากกว่าลูมิเนียม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ทราบว่าในจุดนี้คือ เฟสยูเทกติกซิลิกอนหรือขอบเกรนซึ่งสามารถพบได้ทั้ง 2 สภาวะ ในจุดที่ 2 หรือ Spectrum 2 เป็นตำแหน่งของเกรนหรืออนุภาค $\alpha-Al$ ซึ่งในบริเวณจุดนี้พบลูมิเนียมปริมาณมากแต่ยังพบปริมาณของซิลิกอนและแมงกานีสอยู่เล็กน้อย ในจุดที่ 3 หรือ Spectrum 3 ซึ่งเป็นจุดที่มีความสว่างมากที่สุดในภาพที่ 10 และ 11 จากการวิเคราะห์พบว่า มีธาตุเหล็กและแมงกานีสรวมอยู่ด้วยทำให้ทราบว่าจุดนี้คือ สารประกอบอินเตอร์เมทัลลิก (Intermetallic Compounds) ชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติและชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม มีความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนคือ รูปร่างของสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกคือ Al_2Mn_3Si ซึ่งพบได้ในลูมิเนียมเกรด 3xxx เท่านั้น ซึ่งมีสมบัติความแข็งแรงที่สูงมาก (Birbilis & Buchheit, 2005) โดยชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติ พบว่ามีขนาดใหญ่กว่าที่เชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม เนื่องจากชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติซึ่งมีอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานที่ช้ากว่าชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม ทำให้เฟสอินเตอร์เมทัลลิก มีระยะเวลาในการฟอร์มตัวที่ยาวนานกว่าการเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุม ทำให้มีขนาดที่ใหญ่กว่า ซึ่งการที่มีสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกที่ใหญ่ทำให้ชิ้นงานเปราะจนเกินไป (Merlin & Garagnani, 2009)



ภาพที่ 10 โคโรสวั่งจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ของชิ้นงานเชื่อมตามเข็มนาฬิกาภายใต้บรรยากาศปกติ

ตารางที่ 6 ธาตุในชิ้นงานของ Spectrum ทั้ง 3 จุด

Spectrum	Al	Si	Fe	Mn	Mg
1	12.9	71.3	-	-	-
2	84.9	1.3	-	-	0.1
3	51.6	18.9	15.6	1.0	0.1



ภาพที่ 11 โคโรสวั่งจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) ของชิ้นงานเชื่อมตามเข็มนาฬิกาภายใต้แก๊สปกคลุม



ตารางที่ 7 ธาตุในชิ้นงานของ Spectrum ทั้ง 3 จุด

Spectrum	Al	Si	Fe	Mn	Mg
1	21.6	66.6	-	-	-
2	84.2	1.4	-	-	-
3	66.6	17.3	2.9	1.0	0.1

อภิปรายผล

จากผลการวิจัยพบว่า แนวเชื่อมของชิ้นงานเชื่อมทั้ง 3 สภาวะมีความชื้นลึกและความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมประสานกันได้ดี แนวเชื่อมมีแนวรูขรุขระอันเนื่องมาจากอิทธิพลของเกลียวดอกสว่านพบรูพรุนในแนวเชื่อมมากที่สุด เกิดจากความร้อนทำให้เนื้อเชื่อมมีการกวนด้วยดอกสว่าน จึงทำให้อากาศสามารถแทรกตัวลงไปยังเนื้อเชื่อมได้ อย่างไรก็ตามการเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุมสามารถลดรูพรุนในเนื้อเชื่อมได้ เนื่องจากแก๊สที่ใช้เป็นแก๊สเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยากับอากาศ (How et al., 1995) ในส่วนของรูพรุนของด้านเคลื่อนที่เมื่อเปรียบเทียบกับด้านเสริมการเคลื่อนที่ พบว่าด้านการเคลื่อนที่จะมีรูพรุนมากกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่ที่เกิดจากอิทธิพลของดอกสว่านที่ทำให้เกิดรอยแยกด้านชิ้นงานด้านการเคลื่อนที่มากกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่ จึงทำให้อากาศแทรกตัวเข้าไปได้ง่ายกว่า ทั้งนี้จากการค้นคว้าข้อมูลพบว่าในขณะที่ดอกสว่านกวนแนวเชื่อม การเสียดสีระหว่างดอกสว่านกับด้านด้านการเคลื่อนที่ทำให้ด้านด้านการเคลื่อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่ประมาณ 50°C เป็นเหตุให้ด้านด้านการเคลื่อนที่มีค่าความแข็งแรงต่ำกว่าด้านเสริมการเคลื่อนที่ (Threadgill et al., 2009) นอกจากนี้ขนาดเกรนในด้านการเคลื่อนที่และด้านเสริมการเคลื่อนที่มีขนาดโตกว่าในบริเวณเนื้อเชื่อมเกิดจากเมื่อให้ความร้อนขณะการเชื่อมจะทำให้ความร้อนในบริเวณใกล้เคียงที่ไม่ถูกกวนประสานมีค่าความร้อนที่มากกว่าเส้นโซลัสทำให้เฟส θ ในชิ้นงานเชื่อมหลอมละลายรวมเข้ากับเฟส α -Al ขนาดเกรนในบริเวณดังกล่าวจึงขยายโตขึ้นและทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง (Muangjumburee, 2012, Sikon, 2008, Saisang et.al., 2011) และจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM/EDX) พบว่าชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุมมีเนื้อเนื้อเนื้อที่เรียบ รูปร่างเล็กกว่าชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้บรรยากาศปกติทำให้ชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แก๊สเหนียวกว่าซึ่งส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

สมบัติทางกลของแนวเชื่อม พบว่า ทิศทางการหมุนของดอกสว่านไม่มีอิทธิพลต่อค่าสมบัติทางกลของแนวเชื่อม เพราะผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงและผลการทดสอบค่าความแข็งแรงมีค่าใกล้เคียงกันเพียงแต่สลับด้านด้านเคลื่อนที่และด้านเสริมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานเท่านั้น (Panneerselvam & Lenin, 2014) ในส่วนของชิ้นงานเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุมพบว่า มีค่าสมบัติที่ดีกว่าการเชื่อมในบรรยากาศปกติ เนื่องจากแก๊สสามารถลดรูพรุนของเนื้อเชื่อมได้ เมื่อรูพรุนในเนื้อเชื่อมลดลงทำให้ค่าสมบัติเชิงกลนั้นดีขึ้นตามไปด้วย

สรุป

- 1) การเปลี่ยนทิศทางการหมุนของดอกสว่านไม่ได้ส่งผลต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยา (โครงสร้างทางกายภาพ โครงสร้างมหภาค จุลภาคและจำนวนรูพรุน) และสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม (ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมและค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อม) เพียงแค่ทำให้ชิ้นงานมีชิ้นงานด้านด้านการเคลื่อนที่และด้านเสริมการเคลื่อนที่สลับด้านกัน
- 2) การเชื่อมภายใต้แก๊สปกคลุมสามารถลดรูพรุนได้และส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม (สมบัติเชิงกล) เพิ่มขึ้นด้วย

3) สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเชื่อมในสถานะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง SSM356 คือ การเชื่อมที่ใช้ความเร็วรอบดอกสว่าน 1,750 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 75 mm/min ดอกสว่านหมุนตามเข็มนาฬิกา ภายใต้ไนโตรเจนแก๊สอัตราการไหล 5 l/min อุณหภูมิแก๊สที่ 300°C ควบคุมอุณหภูมิขึ้นงานให้อยู่ในช่วง 580-590°C ตลอดการเชื่อม

ข้อเสนอแนะ

การเชื่อมโดยใช้ส่วนไฟฟ้าอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นงานมากกว่าการเชื่อมโดยใช้หัวกวน เพราะบางขึ้นงานมีความซึมลึกที่ไม่เพียงพอ ส่งผลให้สมบัติของแนวเชื่อมลดลง จึงแนะนำให้สร้างตัวจับยึดสว่านไฟฟ้าที่มั่นคงเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีการซึมลึกเท่ากันทั่วทั้งแนวเชื่อม

รายการอ้างอิง (References)

- Birbilis, N. & Buchheit, R.G. (2005). Electrochemical Characteristics of Intermetallic Phase in Aluminum Alloys. *Journal of the Electrochemical Society*, 152(4), 140-151.
- Binrohini, P & Muangjunburee, P. (2015). Improvement of Semi-Solid State of SSM Aluminum Alloys. The 30th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Prince of Songkla University. (in Thai)
- Jung, B., Lee, H., & Park H. (2013). Effect of grain size on the indentation hardness for polycrystalline materials by the modified strain gradient theory. *International Journal of Solid and Structure*, 50, 2719-2724.
- Merlin, M & Garagnani, G. (2009). Mechanical and microstructure characterization of A356 casting realized with full and empty cores. *Metallurgical Science and Technology*, 27(1), 21-30.
- Muangjunburee, P. (2012). *Welding Engineering*. Songkla: Education Technology, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University. (in Thai)
- Panneerselvam, K & Lenin, K. (2014). Joining of Nylon 6 plate by friction stir welding process using threaded pin profile. *Materials and Design*, 53, 302-307.
- Petkhwan, A., Muangjunburee, P & Wannasin, J. (2014). Investigation of microstructure and mechanical properties of semi-solid state joining SSM aluminum alloys. *Mechanics and Materials*, 496(500), 371-375.
- Threadgill, P.L., Leonard, A.J., Shercliff, H.R & Withers, P.J. (2009). Friction stir welding of aluminum alloys. *International Review*, 54(2), 49-93.
- How, Q., Mutharasan, R. & Kozal, M. (1995). *Feasibility of aluminum nitride formation in aluminum alloys*. Materials of Science and Engineering.
- Saisang, C., Makklang, A & Kongtrakul, W. (2011). *Welding Metallurgy*. Bangkok: Se-education.
- Sikon, L. (2008). *Materials Engineering*. Songkla: Education Technology, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University. (in Thai)
- Wanasin, J & Thanabumrungrul, S. (2008). Development of a Semi-Solid metal processing technique for aluminium casting application. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 30(2), 215-220.
- Wanasin, J., Burapa, R & Canyut, R. (2009). Improvement of aluminum A356 Casting by GISS process. 7th Engineering Conference, Prince of Songkla University. (in Thai)