สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง 356 กับ 7075 ด้วยเทคนิคการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลว

Mechanical Properties and Metallurgical Structure of Semi-Solid Metal 356 Aluminum Alloy with Semi-Solid Metal 7075 Aluminum Alloy investigated using a Transient Liquid Phase Bonding Technique

ยงยุทธ ดุลยกุล,[1*] ชัยยุทธ มีงาม,[2] เดช เหมือนขาว[1]

Yongyuth Dunyakul,[1]* Chaiyoot Meengam,[2] Dech Maunkhaw[1]

Received: 7 September 2018 ; Revised : 8 November 2018 ; Accepted: 4 January 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 และเกรด 7075 ด้วยการวิธีการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลว โดยใช้สังกะสีผสม เกรด ZA 27 เป็นวัสดุประสาน ชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็งเตรียมเป็นรูปทรงกระบอก เป็นการเชื่อมแบบต่อชน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 45 มิลลิเมตร และสังกะสีผสมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร หนา 0.25 มิลลิเมตร ตัวแปรในการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว ได้แก่ เวลาในการกดแช่ 60 นาที และ 120 นาที อุณหภูมิในการเชื่อม 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แรงกด 4 MPa อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนปกคลุม 4 ลิตร/นาที จากการประเมินผลการทดลองพบว่าลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการเชื่อมยึดติดได้ดีทุกการทดลอง ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างเดิมของวัสดุ แสดงให้เห็นว่าขนาดของเกรนโตขึ้น เพราะอิทธิพลของความร้อน อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิเชื่อม 550 องศาเซลเซียส ที่เวลาเชื่อม 120 นาที แสดงให้เห็นว่ามีโพรงอากาศเกิดขึ้นหลังจากการเชื่อม การทดสอบแรงดึงพบว่าชิ้นงานเกิดการขาดบริเวณรอยต่อทุกการทดลอง โดยอุณหภูมิเชื่อม 500 องศาเซลเซียส ที่เวลาเชื่อม 60 นาที มีค่าแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดที่ 103.06 MPa และผลของการทดสอบความแข็งพบว่าบริเวณรอยต่อมีแนวโน้มที่ให้ค่าความแข็งสูงกว่าบริเวณอื่นของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามเทคนิคการการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวสามารถลดเวลาในกระบวนการเชื่อมแพร่ได้

คำสำคัญ: อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง 356 อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง 7075 สมบัติทางกล การเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลว

Abstract

In this paper, factors affecting mechanical properties and metallurgical structure of semi-solid aluminum alloy grades 356 and 7075 were investigated by a transient liquid-phase bonding method. ZA 27 zinc alloys were used as coagulants (solders) in a liquid state during the welding process. Semi-rigid aluminum castings with butt joints were prepared as a cylindrical shape 12 mm in diameter, 45 mm length and ZA 27 zinc alloys were 12 mm in diameter, and 0.25 mm thick. Variables in this transient liquid-phase bonding method included 60 minutes and 120 minutes welding time, welding temperatures at 450, 500 and 550 degrees Celsius, compression pressure at 4 MPa, and the flow rate of argon gas atmosphere at 4 liters/min. According to the results, the physical characteristics of all samples

[1] ผู้ช่วยศาสตราจารย์, [3]รองศาสตราจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดสงขลา 90000

[2] อาจารย์, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

[1] Assist. Prof., [3]Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla 90000

[2] Lecture, Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University, Songkhla, 90000

** Corresponding author; Dyongyuth@gmail.com*

were well bonded. The microstructure in the bond line showed that size of the grain had grown because of the heat during transient liquid-phase bonding. However, at temperature 550ºC and compressive holding time for 60 minutes some porosities showed after welding, and the tensile strength of all samples were broken in the bonded line. However, at temperature 500ºC and compressive holding time 60 minutes, the maximum average tensile strength at 103.06 MPa was in the bonded line area where the hardness properties were higher than in other areas. In short, transient liquid-phase bonding technique could reduce welding time when compared to the diffusion bonding process.

Keywords: Semi-Solid 356 Aluminum Alloy, Semi-Solid 7075 Aluminum Alloy, Mechanical Properties, Transient Liquid-Phase Bonding

บทนำ

การเชื่อมแพร่ (Diffusion Bonding: DB) เป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State) ที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมอากาศยาน (Aircraft Industry) โดยเฉพาะทั่วไปใช้เชื่อมต่อถังเชื้อเพลิงของเครื่องบิน[1] (Fuel Tank) เนื่องจากรอยต่อเชื่อมมีคุณภาพสูงและสามารถกำจัดจุดบกพร่องจากการเชื่อมได้ดี (Defect) นอกจากนั้นยังมีความสามารถที่ดีในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดกัน (Dissimilar Welding) การเชื่อมแพร่อาศัยการยึดติดกันของชิ้นงานด้วยกลไกการแพร่ แลกเปลี่ยนกันของอะตอมภายในเนื้อวัสดุ ทั้งแพร่แบบแทรกที่และแบบแทนที่ระหว่างอะตอม ความร้อนในขณะเชื่อมจะเป็นพลังงานกระตุ้นให้อะตอมเกิดการเคลื่อนที่ (Movement of Atom) เมื่อเวลาในการเชื่อมเหมาะสมอะตอมที่เคลื่อนที่จะกำจัดช่องว่าง ส่งผลให้ชิ้นงานยึดติดกัน[2] (Bonded) อย่างไรก็ตามการเชื่อมแพร่วัสดุกลุ่มอะลูมิเนียมมักจะไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากวัสดุกลุ่มอะลูมิเนียมมีออกไซด์ฟิล์ม (Al_2O_3) เคลือบอยู่ที่ผิวของวัสดุ อะลูมิเนียมออกไซด์ฟิล์มมีจุดหลอมเหลวที่สูง (Melting Point) ทำให้ขัดขวางการแพร่ของอะตอม ดังนั้นการเชื่อมต่ออะลูมิเนียมเข้าด้วยกันจึงทำได้ยาก[3] นอกจากนั้นการเชื่อมแพร่ยังมีข้อจำกัดในการเชื่อม โดยเฉพาะการใช้เวลาในการเชื่อมที่ยาวนาน (Long Time of Welding) เพราะต้องอาศัยการเคลื่อนที่ของอะตอมอย่างช้า ๆ[4] ในขณะเดียวกัน ปัจจุบันเทคโนโลยีการขึ้นรูปของอะลูมิเนียมถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยอาศัยการขึ้นรูปด้วยการหล่อในสถานะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal, SSM) ซึ่งการหล่อกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการพ่นฟองแก๊สเฉื่อยมีความน่าสนใจ (GISS Method) เนื่องจากให้สมบัติทางกลของวัสดุที่ดี (Mechanical properties) สามารถลดต้นทุนในการหล่อชิ้นงานได้ (Reduce Cost) และยังให้โครงสร้างจุลภาคแบบก้อนกลม[5] (Globular Microstructures) อะลูมิเนียมหล่อผสม เกรด 7075 และอะลูมิเนียมหล่อผสม เกรด 356 มีการใช้งานทั่วไปในการผลิตชิ้นส่วนเครื่องบิน ก็นิยมขึ้นรูปด้วยการหล่อกึ่งของแข็ง เพราะต้องการเพิ่มสมบัติทางกลให้สูงขึ้น (Joint Materials) การเชื่อมอะลูมิเนียมด้วยการแพร่จึงควรเพิ่มเทคนิคในการเชื่อม เพื่อให้เกิดการกำจัดอะลูมิเนียมออกไซด์ฟิล์มและยังคงสมบัติทางกลหลังการเชื่อมที่ดี การเชื่อมแพร่ด้วยเทคนิคผ่านเฟสของเหลว (Transient Liquid Phase Bonding) เป็นการเชื่อมที่ใช้วัสดุประสานระหว่างชิ้นงานเชื่อมทั้งสองชิ้น โดยให้วัสดุประสานมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าวัสดุเชื่อม ซึ่งในขณะเชื่อมจะทำให้วัสดุประสานอยู่ในสถานะของเหลว (Liquid State) แต่วัสดุเชื่อมยังอยู่ในสถานะของแข็ง[6] ส่งผลให้ของอะตอมวัสดุประสานเกิดการเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เพราะอยู่ในสถานะของเหลว การเกิดสถานะของเหลวเฉพาะบริเวณรอยต่อของชิ้นงานในขณะเชื่อมจะทำให้เกิดการทำลายอะลูมิเนียมมีออกไซด์ฟิล์ม นำไปสู่การยึดติดที่ดีของชิ้นงานหลังการเชื่อม[7]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 356 กับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 โดยใช้สังกะสี เกรด ZA27 เป็นวัสดุประสาน โดยศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเชื่อม โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อ สมบัติทางด้านแรงดึง และสมบัติทางด้านความแข็ง ผลจากการทดลองจะถูกประเมินผล (Evaluation of result) และสรุปผลการทดลองต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณรอยต่อของชิ้นงานเชื่อมและสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังการเชื่อม ซึ่งสนใจศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อ (Bonded Line) จากการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลว

ระเบียบวิธีวิจัย

วัสดุ

การวิจัยนี้ใช้อะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 มีซิลิกอนเป็นส่วนผสมหลักทางเคมี ชิ้นงานเชื่อมออกแบบให้ต่อชน (Butt Joint) กับอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075

มีสังกะสีเป็นส่วนผสมทางเคมีหลัก โดยวัสดุทั้งสองมีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงใน Table 1 อะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 และ 7075 ผ่านการหล่อขึ้นรูปแบบอัด (Squeeze Casting) ซึ่งการหล่ออยู่ในสถานะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีแบบการหล่อกึ่งของแข็งแบบปล่อยฟ่นฟองก๊าซ (Gas Induce Semi-Solid; GISS) ด้วยการสนับสนุนโดยบริษัทกิสโก จำกัด สำหรับวัสดุประสานใช้สังกะสี เกรด ZA 27 มีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงใน Table 2

Table 1 Chemical composition of aluminum alloy (mass fraction %)[8]

Materials	Element (Wt%)			
SSM356	**Si**	**Fe**	**Cu**	**Mn**
	7.74	0.57	0.05	0.06
	Mg	**Zn**	**Ti**	**Al**
	0.02	0.05	0.31	Bal.
SSM7075	**Zn**	**Fe**	**Cu**	**Mg**
	6.08	0.46	1.93	2.50
	Al			
	Bal.			

Table 2 Chemical composition of zinc alloy (mass fraction %)[9]

Materials	Element (Wt%)			
ZA27	**Al**	**Fe**	**Cu**	**Mn**
	4.20	0.01	3.22	0.82
	Mg	**Si**	**Ni**	**Zn**
	0.91	0.81	0.05	Bal.

วิธีการทดลอง

อะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 และอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 ถูกเตรียมรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด 12 มิลลิเมตร ที่ความยาว 45 มิลลิเมตร ในขณะเดียวกันสังกะสีผสม เกรด ZA 27 ถูกเตรียมเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด 12 มิลลิเมตร ความหนา 2.5 ไมโครเมตร วัสดุทดลองก่อนการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวจะผ่านการขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายหยาบ เบอร์ 220 และทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานด้วยน้ำยาอะซิโตน (Acetones) เป็นเวลา 60 วินาที เพื่อทำความสะอาดผิวงานเชื่อมจากคราบสกปรกและคราบไขมันที่ติดผิวงาน จากนั้นใช้ลมเป่าจนผิวชิ้นงานแห้ง นำชิ้นงานเข้าเตาอบเพื่อเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลว ดังแสดงใน Figure 1 การศึกษาเบื้องต้นจะกำหนดให้ชิ้นงานด้านบนเป็นอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 และอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 ชิ้นงานจะอยู่ด้านล่าง โดยใช้สังกะสีผสม เกรด ZA 27 เป็นชิ้นงานประสานตรงกลางระหว่างชิ้นงานเชื่อมทั้งสองชิ้น โดยสังกะสีผสม เกรด ZA 27 จะเกิดการหลอมละลายเมื่ออุณหภูมิเชื่อมสูงเกิน 399 องศาเซลเซียส แต่อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 และอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 จะไม่เกิดการหลอมละลาย เนื่องจากมีอุณหภูมิหลอมละลายที่ 660 องศาเซลเซียส ดังแสดงตัวแปรในการทดลองใน Table 3

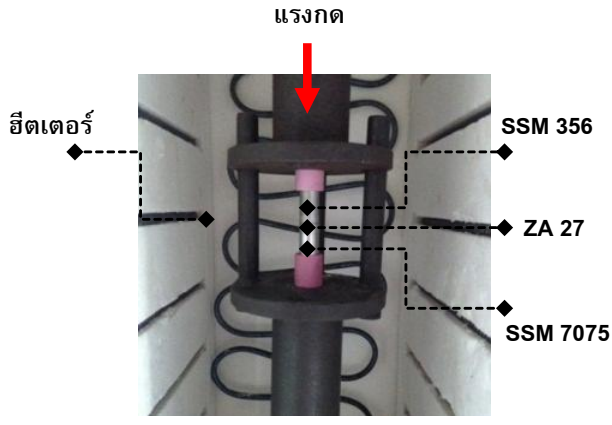

Figure 1 Shows the principle of transient liquid-phase bonding process using ZA27 Zinc Alloy Interlayer

Table 3 Parameters of the transient liquid-phase bonding process

Parameters	**Level**		
Temperature (°C)	450	500	550
Time (minute)	60	120	
Contract pressure (MPa)	4		
Argon flow rate (liter per minute)	4		

การเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวอาศัยการยึดติดของชิ้นงานจากการแพร่ของอะตอมภายในเนื้อวัสดุทั้งสองชนิด ส่งผลให้อุณหภูมิเชื่อม มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของอะตอม ดังนั้นการให้ความร้อนในขณะเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวได้กำหนดขั้นตอนการให้ความร้อน ดังแสดงใน Figure 2 สำหรับการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวจะทดลองตัวแปรละ 6 ชิ้นงาน เพื่อนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติทางกลและตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

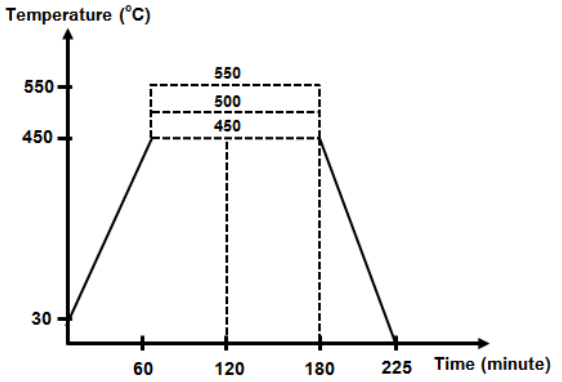

Figure 2 Stages of temperature control for transient liquid-phase bonding process

การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

ชิ้นงานหลังการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวบางส่วนถูกนำมาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยา โดยมีการเตรียมชิ้นงานให้เหลือครึ่งหนึ่งของชิ้นงานรูปทรงกระบอก เพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อ ชิ้นงานถูกการทำเรือนครอบด้วยการหล่อเรซิ่นแล้วใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เรซิ่นเกิดการแข็งตัว ครอบชิ้นงานในอัตราส่วน 10: 1 (เรซิ่น 10 ส่วน ต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 1 ส่วน) จากนั้นขัดผิวหน้าของชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบ เบอร์ 220, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ ขัดละเอียดด้วยการขัดบนจานหมุนที่หุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยมีน้ำผสมผงอะลูมิน่า ที่มีขนาดอนุภาค 5.0, 1.0 และ 0.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิคแบบคลื่นความถี่ เป็นเวลา 3 นาที แล้วนำชิ้นงานไปกัดผิวหน้าด้วยสารละลายคิลเลอร์ (Keller's reagent) ซึ่งประกอบด้วยน้ำ (H_2O) ไฮโดรคลอริก (HCL) ไนตริก (HNO) และไฮโดรฟลูออริด (HF) ผสมในสัดส่วน 190: 3: 5: 2 ส่วน เป็นระยะเวลา 5-10 วินาที แล้วนำผิวหน้ารอยต่อของชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

การทดสอบสมบัติทางกล

ทำการทดสอบแรงดึง (Tensile Strength Test) ตามมาตรฐาน ASTM A310-10 (American Society of Testing and Materials)[10] รูปร่างของชิ้นงานถูกกำหนดเป็นชิ้นงานทดสอบแบบทรงกระบอก การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการดึง $1.67x10^{-2}$ มิลลิเมตรต่อวินาที ดังแสดงใน Figure 3

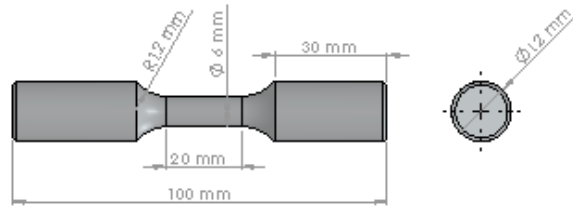

Figure 3 The specimens follow ASTM A310-10 standard

ทำการทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ด้วยเครื่องทดสอบวิกเกอร์ (Vickers) โดยใส่น้ำหนักกดของหัวกดคงที่ (Load Fixed) ไว้ที่ 100 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที วัดค่าความแข็งตามยาวชิ้นงานเชื่อมจำนวน 7 ตำแหน่ง (ตามแนวขวางของรอยต่อ) โดยระยะห่างระหว่างรอยกดในแต่ละตำแหน่งกดที่ 2 มิลลิเมตร

ผลการวิจัย

ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเชื่อม

การเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 กับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 โดยใช้สังกะสีผสม เกรด ZA 27 เป็นตัววัสดุประสานพบว่าตัวแปรในการทดลองส่งผลต่อการเสียรูปของชิ้นงานเชื่อม โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการเชื่อมและเวลาในการเชื่อมที่สูง มีแนวโน้มที่ส่งผลให้ชิ้นงานหลังการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวเกิดการเสียรูปอย่างถาวร[11] (Plastic deformation) ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิเชื่อม 450 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 60 นาที ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรอื่นๆ ในการทดลอง ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มอุณหภูมิเชื่อมเป็น 550 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 120 นาที ส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยสังเกตได้ว่าเกิดการโก่งงอ (Bucking) และการบวมบริเวณรอยต่อ (Bloat) และปลายของชิ้นงานเชื่อม ในขณะเดียวกันการเสียรูปของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวอาจส่งผลต่อการนำชิ้นงานเชื่อมไปใช้งาน ดังนั้นอุณหภูมิเชื่อม 550 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 120 นาที จึงเป็นตัวแปรสูงสุดที่ได้นำมาศึกษาวิจัยครั้งนี้ สำหรับลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานของตัวแปรอื่นๆ ดังแสดงใน Figure 4

ลักษณะโครงสร้างมหภาค

ผลการศึกษาโครงสร้างมหภาคบริเวณรอยต่อของตัวแปรต่างๆ แสดงดัง Figure 5 พบว่าอิทธิพลของความร้อนส่งผลให้ชิ้นงานยึดติดกัน ซึ่งสามารถสรุปได้จากลักษณะ

โครงสร้างมหภาคของทุกตัวแปรในการทดลอง คือ ชิ้นงานหลังการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวมีการยึดติดของชิ้นงานทุกการทดลอง อย่างไรก็ตามความร้อนที่เกิดจากตัวแปรในการทดลองยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน โครงสร้างมหภาคบริเวณรอยต่อที่อุณหภูมิเชื่อม 450 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 60 นาที มีเส้นรอยต่อ (Bond Line) แสดงอย่างชัดเจน ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเชื่อมและเวลาในการเชื่อมส่งผลให้เส้นรอยต่อมีขนาดที่เล็กลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงส่งผลให้เกิดพลังงานกระตุ้น (Activity Energy) ในอะตอมที่สูงด้วย[12] ทำให้อะตอมมีอิสระในการแพร่ (Freedom of Diffuse) ในขณะเดียวกัน การเพิ่มเวลาในการเชื่อมส่งผลให้มีเวลาในการกำจัดช่องว่างที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสของชิ้นงาน (Eliminations of Voids) อย่างไรก็ตาม อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 จะเกิดการบวมบริเวณรอยต่อสูงกว่าอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 เพราะอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 สัมประสิทธิ์ทางความร้อนที่ดีกว่าอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 จึงมีความสามารถในการรับความร้อนที่ดี[13] ส่งผลให้เกิดการเสียรูปแบบบวมได้ง่าย

Parameters		Characteristics of samples
Temperature (°C)	Time (minute)	
450	60	
500		
550		
450	120	
500		
550		

Figure 4 Physical characteristics of samples after transient liquid-phase bonding process

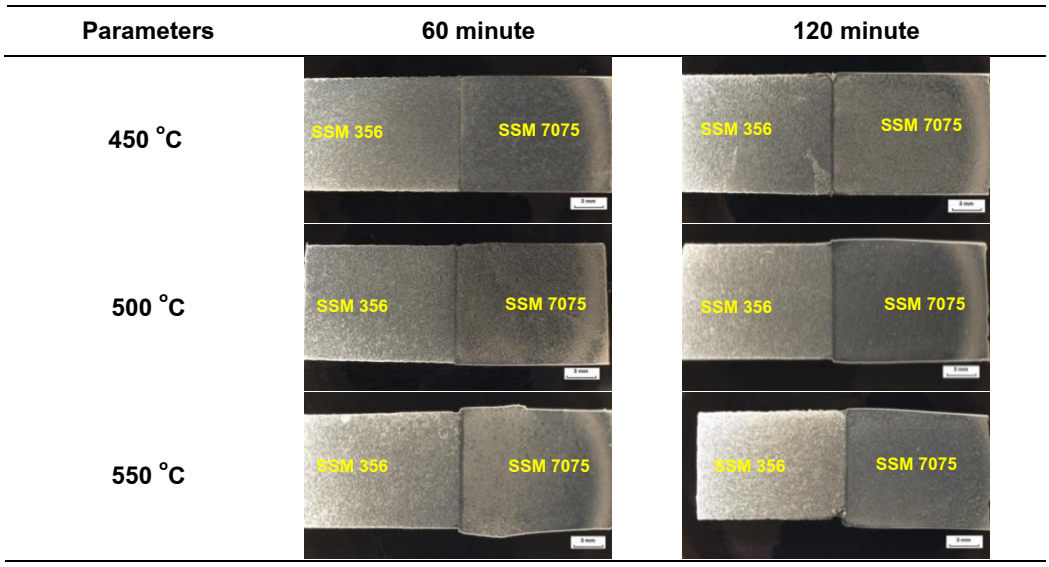

Figure 5 Macro structure of the samples after transient liquid-phase bonding process

ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค จะตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 100 เท่า เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างบริเวณรอยต่อของชิ้นงาน ตรวจสอบจุดบกพร่อง (Defect) และความสมบูรณ์ของรอยต่อในแต่ละตัวแปรของการทดลอง โดยได้กำหนดตำแหน่งในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคไว้บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน เพราะเป็นบริเวณที่ความร้อนแผ่เข้าไปได้ช้าที่สุด เนื่องจากอยู่ในบริเวณด้านในสุดของวัสดุ ดังนั้นบริเวณนี้มีความเสี่ยงที่จะเกิดจุดบกพร่องและความไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานได้ง่าย ตำแหน่งในการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) ดังแสดงใน Figure 6

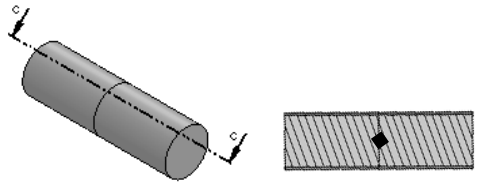

Figure 6 The area where the microstructure was inspected

โครงสร้างจุลภาคจากการทดลองแสดงดัง Figure 7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่โลหะเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 ประกอบไปด้วย เฟสแอลฟ่า (α-Al) แบบก้อนกลมผสมกับเฟสยูเทคติก (Eutectic; Mg_2Si) และอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 ก็มีธาตุผสมคล้ายๆ กัน ซึ่งประกอบไปด้วย เฟสแอลฟ่า (α-Al) แบบก้อนกลมผสมกับเฟสยูเทคติก (Eutectic; $MgZn_2$) เมื่อได้รับอิทธิพลของความร้อนจากการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลว ก็ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่โลหะเดิมของวัสดุเชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยความร้อนจะส่งผลให้อะตอมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็งทั้งสองเกรด เกิดการแลกเปลี่ยนอะตอมแบบแทนที่ (Surrogate of Atom) เนื่องจากขนาดของอะตอมทั้งสองมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน นำไปสู่การเติบโตของขนาดเกรน (Grain Growth) อย่างไรก็ตาม สังกะสีผสม เกรด ZA 27 จะเป็นพลังงานกระตุ้นอะตอมของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 และ เกรด 7075 เพราะสังกะสีผสม เกรด ZA 27 ที่อุณหภูมิเชื่อม 450-550 องศาเซลเซียส อยู่ในสถานะของเหลวทั้งหมด (สังกะสีผสม เกรด ZA 27 มีจุดหลอมเหลวที่ 339 องศาเซลเซียส) ทำให้เกิดการแพร่ของอะตอมได้อย่างมีอิสระ โดยในสภาวะของเหลว อะตอมมีความสามารถในการแพร่ที่ดีกว่าในสถานะของแข็ง[14] โดยผลการทดลองแสดงได้จากอุณหภูมิเชื่อม 550 องศาเซลเซียส เกิดการแพร่ของอะตอมสังกะสีผสม เกรด ZA 27 ไปยังอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 และ เกรด 7075 อย่างชัดเจน ในทางตรงกันข้าม อุณหภูมิเชื่อม 450 องศาเซลเซียส ช่วงการแพร่ของอะตอมสังกะสีผสม เกรด ZA 27 มีช่วงที่แคบ เนื่องจากพลังงานกระตุ้นไม่สูงพอ ให้อะตอมสังกะสีผสม เกรด ZA 27 แพร่ไปยังวัสดุเชื่อม

อย่างไรก็ตามบริเวณรอยต่อและข้างๆ เกิดโพรงอากาศ (Porosity) ที่อุณหภูมิเชื่อม 550 องศาเซลเซียส เนื่องจากในสถานะของเหลวความชื้นในอากาศแทรกตัวได้ง่าย เมื่อเกิดการเย็นตัวของชิ้นงานหลังการเชื่อม ความชื้นไม่สามารถออกมาได้ทัน จึงฝังตัวเป็นโพรงอากาศในรอยต่อชิ้นงาน นอกจากนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นในการเชื่อมแพร่แบบผ่าน

เฟสของเหลวส่งผลให้ชิ้นงานหลังการเชื่อมมีความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากชิ้นงานเชื่อมทั้งชิ้นได้รับอิทธิพลของความร้อน โดยความแข็งที่เพิ่มขึ้นมาจากการตกตะกอนของเฟสยูเทกติกในเนื้อวัสดุ (Precipitation hardening) และอีกสาเหตุส่งผลมาจากความเค้น จากการกดชิ้นงานในขณะเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลว

ลักษณะการขาดของผิวรอยต่อ

ลักษณะการขาดของผิวรอยต่อจะขึ้นกับลักษณะของการยึดติดของผิวงานเชื่อม ดังแสดงใน Figure 8 ชิ้นงานที่ผิวยึดติดดีจะเกิดการแลกเปลี่ยนเนื้อวัสดุกัน ส่งผลให้ลักษณะของผิวรอยต่อเป็นร่องลึก ในทางตรงกันข้ามชิ้นงานที่ผิวรอยต่อยึดติดไม่ดี ลักษณะการขาดของผิวรอยต่อจะเป็นแบบผิวเรียบและพบรอยขัดจากกระดาษทราย การยึดติดของชิ้นงานจะเริ่มจากขอบผิวชิ้นงานด้านนอก เนื่องจากเป็นจุดเริ่มต้นของการแพร่ การเพิ่มอุณหภูมิในการเชื่อมส่งเสริมต่อการยึดติดของชิ้นงาน ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที การยึดติดไม่ดี ดังแสดงจากภาพลักษณะการขาดของผิวรอยต่อชิ้นงาน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการเชื่อมที่สูงขึ้นเป็นอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที พบว่าลักษณะของผิวรอยต่อแสดงการยึดติดดีขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะของผิวรอยต่อขรุขระขึ้น

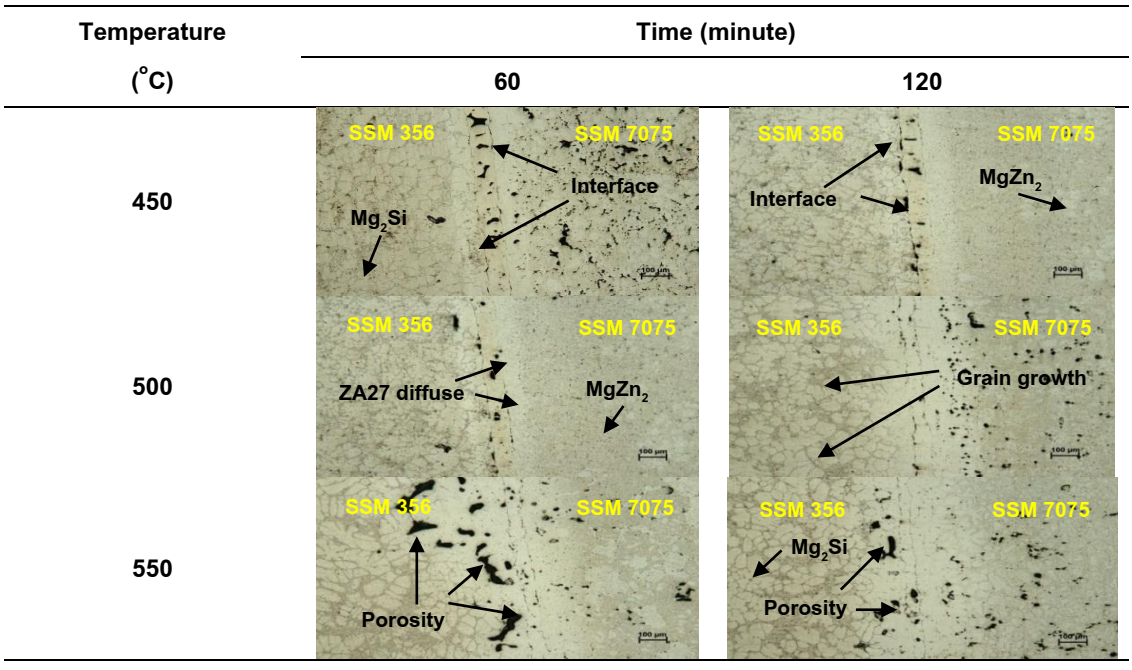

Figure 7 Characteristics of the interface structure after transient liquid-phase bonding

จาก Figure 8 พบว่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ลักษณะของผิวรอยต่อขรุขระมากสุด คาดว่าเกิดจากการแลกเปลี่ยนของเนื้อวัสดุได้ดี แต่บริเวณรอยต่อพบโพรงอากาศขนาดใหญ่ ซึ่งโพรงอากาศขนาดใหญ่เหล่านี้จะส่งผลให้สมบัติทางด้านแรงดึงของชิ้นงานลดลง[15] อย่างไรก็ตาม ตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวจะนำไปสู่สมบัติทางกลที่ดีของชิ้นงานหลังจากการเชื่อม

Temperature (°C)	Time (minute)			
	60		120	
	SSM 356	SSM 7075	SSM 356	SSM 7075
450				
500				
550				

Figure 8 Characteristics of the facture surface after transient liquid-phase bonding

ผลการทดสอบความแข็งแรงดึง

Figure 9 แสดงผลการทดสอบแรงดึง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานหลังจากการเชื่อมทุกการทดลองมีค่าแรงดึงต่ำกว่าเนื้อโลหะเดิมของวัสดุ (Base Materials) โดยอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 มีค่าแรงดึง 156 MPa ในขณะที่อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 มีค่าแรงดึง 210 MPa โดยผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มที่ให้ค่าแรงดึงเฉลี่ยสูงกว่าอุณหภูมิเชื่อมอื่นๆ โดยที่เวลาในการเชื่อม 60 นาที มีค่าแรงดึงเฉลี่ย 103.06 MPa ซึ่งเป็นค่าแรงดึงสูงสุด และเวลาในการเชื่อม 120 นาที มีค่าแรงดึงเฉลี่ย 80.14 MPa ในทางตรงกันข้ามอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ทั้งเวลาในการเชื่อมที่ 60 และ 120 นาที พบว่าค่าแรงดึงมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรในการทดลองอื่นๆ โดยที่เวลาในการเชื่อมที่ 60 นาที ค่าแรงดึงเฉลี่ย 47.51 MPa ซึ่งเป็นค่าแรงดึงที่น้อยสุดจากการทดลอง และเวลาในการเชื่อมที่ 120 นาที มีค่าแรงดึงเฉลี่ย 54.32 MPa ตามลำดับ สาเหตุที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ชิ้นงานหลังการเชื่อมมีความต้านทางแรงดึงต่ำ เกิดจากการเกิดโพรงอากาศบริเวณผิวรอยต่อของชิ้นงาน ส่งผลให้ค่าแรงดึงลดลง[16] อีกสาเหตุมาจากการเสียรูปของชิ้นงานจากความร้อนและเวลาในขณะเชื่อมที่มากเกินไป ส่งผลให้เกิดแรงกดของชิ้นงานไม่อยู่ในแนวแกน เกิดการโก่งงอของชิ้นงานเชื่อมในขณะที่อุณหภูมิสูง ทำให้ชิ้นงานยึดติดกันได้ไม่ดี ดังนั้นตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวจึงมีความสำคัญในการเชื่อมเพื่อรักษาสมบัติทางกลที่ดีและชิ้นงานหลังจากการเชื่อมไม่เกิดความเสียหายจากการเชื่อม[7]

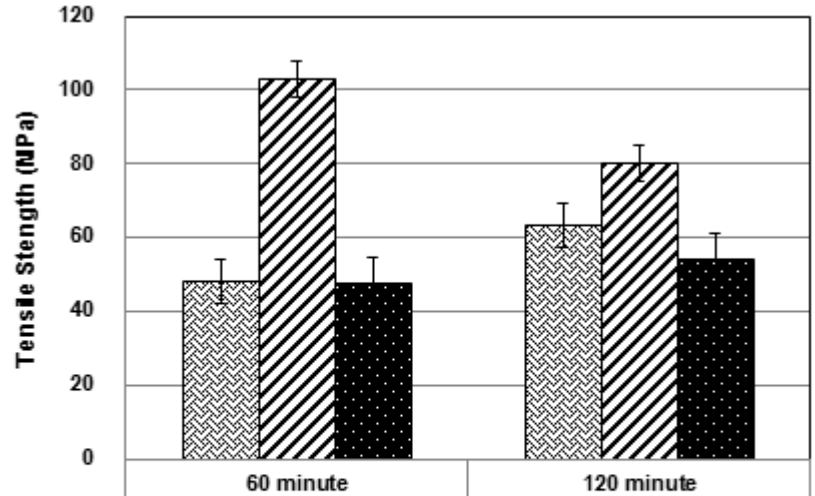

Figure 9 Shows tensile strength of aluminum alloy after transient liquid-phase bonding

ผลการทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังการเชื่อม ดังแสดงใน Figure 10 ผลการทดสอบพบว่าที่เวลาในการเชื่อม 60 นาที บริเวณรอยต่อมีค่าความแข็งสูงกว่าบริเวณอื่นๆ ของชิ้นงาน โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 88.22 HV เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค โดยความร้อนจะส่งผลให้ธาตุผสม (Alloys) ในวัสดุเกิดเป็นสารประกอบใหม่ (New Intermetallic compound) เมื่อชิ้นงานเกิดการเย็นตัว ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น โดยธาตุสังกะสีในวัสดุเกรด ZA 27 จะสนับสนุนความแข็งของชิ้นงานให้เพิ่มขึ้น[2] จากการทดลองสังเกตได้ว่าอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 มีส่วนผสมทางเคมีของธาตุสังกะสีที่สูง จึงมีความแข็งมากกว่าชิ้นงานด้านอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356

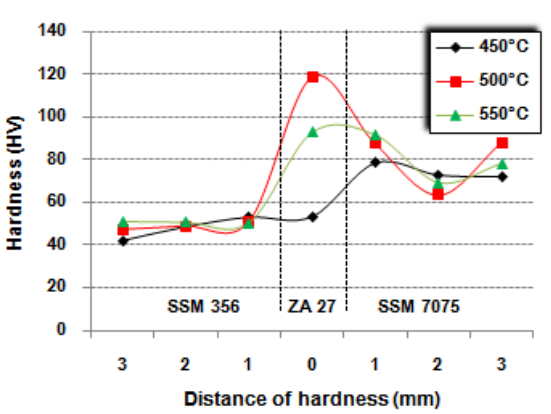

Figure 10 Hardness values of the interface specimens at 60 minutes

Figure 11 แสดงผลของการทดสอบความแข็งของเวลาในการเชื่อม 120 นาที ทั้ง 3 ระดับของอุณหภูมิเชื่อม ผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค โดยค่าความแข็งด้านอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ค่าความแข็งเฉลี่ย 90.47 HV สาเหตุมาจากการตกตะกอน (Precipitation) ของเฟส $MgZn_2$ ในขณะเดียวกันด้านอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 มีผลการทดลองไปในทำนองเดียวกัน เฟส Mg_2Si ก็เกิดการตกตะกอนอิ่มตัวเช่นกัน[8] มีค่าความแข็งเฉลี่ย 45.83 HV

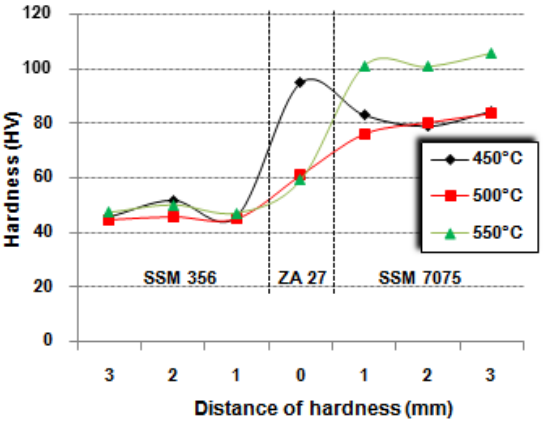

Figure 11 Hardness values of the interface specimens at 120 minutes

อย่างไรก็ตามบริเวณรอยต่อจะมีค่าความแข็งอยู่ระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 กับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 356 ซึ่งมีค่าความแข็งเฉลี่ย 71.57 HV ตามลำดับ

อภิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์เวลาในการเชื่อมเมื่อเปรียบเทียบกับการเชื่อมแพร่แบบเดิม จะเห็นได้ว่าเทคนิคการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวทำให้เวลาในการเชื่อมแพร่เร็วขึ้น เนื่องจากวัสดุประสานอยู่ในสถานะของเหลว ส่งผลให้อะตอมมีพลังงานกระตุ้นมากขึ้น ทำให้กลไกการแพร่ของวัสดุรวดเร็วขึ้นด้วย[8] นอกจากนั้นผลการประเมินสมบัติทางกลหลังการเชื่อมมีแนวโน้มที่ดี อย่างไรก็ตามวัสดุประสานเป็นเทคนิคสำคัญในการเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลว ซึ่งจะต้องเลือกใช้วัสดุที่มีส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกับวัสดุที่นำมาเชื่อมต่อ และต้องมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าวัสดุเชื่อมด้วยเช่นกันจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในการเชื่อมได้ สำหรับกลไกการเชื่อมจะช้าหรือเร็วจะขึ้นอยู่กับการเกิดอะลูมิเนียมออกไซด์ฟิล์มในขณะเชื่อม โดยเฉพาะการเชื่อมต่อวัสดุกลุ่มอะลูมิเนียมที่มักเกิดอะลูมิเนียมออกไซด์ฟิล์มผิวหน้ารอยเชื่อมในขณะเชื่อม ส่งผลให้อะลูมิเนียมออกไซด์ฟิล์มขัดขวางการแพร่ของอะตอมภายในเนื้อวัสดุและนำไปสู่การเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์[6] แต่การเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวยังมีข้อดีในการเชื่อมวัสดุกลุ่มอะลูมิเนียม เพราะเฟสของเหลวที่ละลายในขณะเชื่อมจะกำจัดอะลูมิเนียมออกไซด์ฟิล์มได้ อย่างไรก็ตามควรระวังความเสี่ยงจากการเกิดจุดบกพร่องหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว โดยจุดบกพร่องที่พบจะเป็นโพรงอากาศ ซึ่งเกิดจากการแทรกตัวของอากาศในขณะเชื่อม เมื่อรอยต่อเกิดการเย็นตัวอากาศเหล่านั้นไม่สามารถออกมาได้ทัน ส่งผลให้เกิดเป็นโพรงอากาศภายในชิ้นงานหรือการแตกร้าวจากความร้อน ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังจากการเชื่อม อีกจุดบกพร่องที่พบจะเป็นการเสียรูปของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลว ทำให้ชิ้นงานเกิดการโก่งงอ เสียรูปอย่างถาวร ซึ่งการเกิดจุดบกพร่องเหล่านี้ส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานลดลง[12]

สรุปผล

การเชื่อมแพร่แบบผ่านเฟสของเหลวของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด SSM356 กับ SSM7075 โดยใช้สังกะสี เกรด ZA27 เป็นวัสดุประสาน หลังการเชื่อมยึดติดกันในทุกการทดลอง ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแพร่ผ่านเฟสของเหลวมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจากการตกตะกอนจากความร้อนในขณะเชื่อม เกรนหลังการเชื่อมมีขนาดที่โตเกรนขึ้น สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

(1) ค่าความแข็งของชิ้นงานหลังการเชื่อมที่เวลาในการเชื่อม 60 นาที บริเวณรอยต่อมีค่าความแข็งสูงกว่าบริเวณอื่นๆ ของชิ้นงาน มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 88.22 HV และเวลาในการเชื่อม 120 นาที พบว่าด้านอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 7075 มีค่าความแข็งสูงสุด มีค่าความแข็งเฉลี่ย 90.47 HV

(2) ผลการทดสอบแรงดึงพบว่าอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อม 60 นาที มีค่าแรงดึงเฉลี่ย 103.06 MPa ซึ่งเป็นค่าแรงดึงสูงสุด และอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อมที่ 60 นาที ค่าแรงดึงเฉลี่ย 47.51 MPa ซึ่งเป็นค่าแรงดึงที่น้อยสุด

(3) อิทธิพลของความร้อนและเวลาในการเชื่อมที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค โดยอุณหภูมิเชื่อม 550 องศาเซลเซียส เวลาเชื่อม 120 นาที เกิดโพรงอากาศเกิดขึ้นหลังจากการเชื่อมมากกว่าตัวแปรการทดลองอื่นๆ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องมือในการทดลองวิจัยจากโปรแกรมวิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา และได้รับการสนับสนุนเครื่องมือในการตรวจสอบสมบัติทางกลจากสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือในการตรวจสอบทางโลหะวิทยา ซึ่งทางคณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

บรรณานุกรม

1. M. Mazar Atabaki and J. Idris, “Low-temperature partial transient liquid phase diffusion bonding of Al/Mg_2Si metal matrix composite to AZ91D using Al-based interlayer,” *Materials and Design*, pp.832-841, 2011.
2. Y.J. Jin and T.I. Khan, “Effect of bonding time on microstructure and mechanical properties of transient liquid phase bonded magnesium AZ31 alloy,” *Materials and Design*, pp.32-37, 2012.
3. H. Nami, A. Halvaee and H. Adgi, “Transient liquid phase diffusion bonding of Al/Mg_2Si metal matrix composite,” *Materials and Design,* pp.3957-3965, 2011.

4. J. Maity, T.K. Pal and R. Maiti, “Transient liquid phase diffusion bonding of 6061-15 wt% SiCp in argon environment. *journal of materials processing technology*,” pp.3568-3580, 2009.
5. R. Burapa, S. Janudom, T. Chucheep, R. Canyook, and J. Wannasin, “Effects of primary phase morphology on mechanical properties of Al-Si-Mg-Fe alloy in semi-solid slurry casting process,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, pp.s857–s861, 2010.
6. O.Dezellus, J. Andrieux, F. Bosselet, M. Sacerdote-Peronnet, T. Baffie, F. Hodaj, N. Eustathopoulos and J.C. Viala, “Transient liquid phase bonding of titanium to aluminium nitride,” *Materials Science and Engineering A,* pp. 254-258, 2008.
7. N.S. Bosco and F.W. Zok, “Strength of joints produced by transient liquid phase bonding in the Cu–Sn system,” *Acta Materialia*, pp.2019–2027, 2005.
8. Yongyuth Dunyakul, Chaiyoot Meengam, Dech Maunkhaw and Suppachai Chainarong, “Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties in Dissimilar Joint of SSM7075 with SSM356 Aluminum Alloy using Diffusion Bonding,” *ENGINEERING JOURNAL*, pp.135–144, 2015.
9. Yao hua Zhu, “General Rule of Phase Decomposition in Zn-Al Based Alloys (II) On Effects of External Stresses on Phase Transformation,” *Materials Transactions,* pp. 3083-3097, 2004.
10. Chaiyoot Meengam, Prapas Muangjunburee, and Jessada Wannasin, “Diffusion Bonding of Semi-Solid (SSM 356) Cast Aluminum Alloy,” *International Journal of Modern Engineering Research,* pp.5-11, 2014.
11. M.S. Kenevisi and S.M. Mousavi Khoie, “An investigation on microstructure and mechanical properties of Al7075 to Ti–6Al–4V Transient Liquid Phase (TLP) bonded joint,” *Materials and Design*, pp.19-25, 2012.
12. V. Jalilvand, H. Omidvar, M.R. Rahimipour and H.R. Shakeri, “Influence of bonding variables on transient liquid phase bonding behavior of nickel based superalloy IN-738LC,” *Materials and Design,* pp.36-46, 2013.
13. S.S. Sayyedain, H.R. Salimijazi, M.R. Toroghinejad and F. Karimzadeh, “Microstructure and mechanical properties of transient liquid phasebonding of $Al_2O^p_3$/Al nanocomposite using copper interlayer,” *Materials and Design*, pp.275-282, 2014.
14. L.Z. Zhao, Y. Jiao, M.J. Zhao, and J. Zhang, “Investigation on in situ Al0.5FeSi0.5/Al composites prepared by transien liquid phase sintering,” *Materials and Design*, pp.70-75, 2014.
15. Guifeng Zhang, Jianxun Zhang, Yi Pei, Siyu Li, and Donglang Chai, “Joining of Al_2O_3p/Al composites by transient liquid phase (TLP) bonding and a novel process of active-transient liquid phase (A-TLP) bonding,” *Materials Science and Engineering A*, pp.146-156, 2008.
16. Majid SAMAVATIAN, Ayoub HALVAEE, Ahmad Ali AMADEH, and Alireza KHODABANDEH, “Transient liquid phase bonding of Al 2024 to Ti—6Al—4V alloy using Cu—Zn interlayer,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, pp.770-775. 2015.