

WALAI AutoLib
SK075028

๖๗๙๕๐



รายงานการวิจัย

การเชื่อมต่อทองแดงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410 โดยการแพร่

Diffusion Bonding of Copper to Stainless Steel

เดช เหมือนขาว

Dech Maunkhaw

ยงยุทธ ดุญกุล

Yongyuth Dunyaikul

๖๖๑.๑
๑ ๘๓๑
๒๕๕๕

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

งบประมาณเงินรายได้ประจำปี พ.ศ. ๒๕๕๕

การเชื่อมต่อทองแดงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410 โดยการแพร่

เดช เหมือนขาว¹ และ ยงยุทธ ดุสยกุล²

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของทองแดงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410 โดยกระบวนการเชื่อมแพร่ ในการออกแบบกระบวนการเชื่อมแพร่โดยใช้แผ่นทองแดงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410 มาต่อกัน แล้วทำการเชื่อมด้วยการแพร่ในช่วงที่อุณหภูมิ 800 850 900 และ 950 °C แผ่นทองเหลืองจะถูกกดขึ้นงานภายใต้ความกดดัน 12 MPa เป็นเวลา 60 นาที ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและระยะในการแพร่จากการเชื่อมทองแดงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ผลการวิจัยพบว่าบริเวณการแพร่เห็นได้อย่างชัดที่เกิดขึ้นใกล้ในบริเวณรอยต่อ ความหนาของระยะการแพร่ในบริเวณการแพร่จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

คำสำคัญ : การเชื่อมโลหะต่างชนิด การเชื่อมโดยการแพร่

^{1,2}คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ. สงขลา 90000

Diffusion Bonding of Copper to Stainless Steel

Dech Maunkhaw¹, and Yongyuth Dulyakul²

ABSTRACT

The research were to studied of Microstructure and Mechanical Properties of Copper and Stainless Steel ASIS 410 by Diffusion Welding Process. The design of diffusion process by Copper to Stainless Steel ASIS 410 plates were lap joined through diffusion welding at temperature range of 800 850 900 and 950 °C. These were performed through pressing the specimens under a pressure of 12 MPa for 60 min. The microstructure and phase constitution near the diffusion welding interface of Copper to Stainless Steel ASIS 410 were studied by optical microscopy (OM). The results indicated that an obvious diffusion zone was formed near of the joint. The thickness of diffusion layer in interfaces was increased with increasing temperature

Keywords: Dissimilar joint Diffusion bonding

^{1,2} Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkla 90000

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย งบประมาณเงินรายได้ประจำปี พ.ศ. 2555 (งบประมาณเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์) และได้รับความเอื้อเฟื้อจากบุคคลต่าง ๆ ในการให้คำแนะนำ คำปรึกษาข้อมูลต่าง ๆ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการทำงาน และผู้ที่มีส่วนสนับสนุนในการวิจัยในครั้งนี้ ทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ

คณะผู้วิจัย

กรกฎาคม 2556



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1. ความเป็นมาและความสำคัญ	1
2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
3. ขอบเขตของการวิจัย	2
4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2. ทฤษฎีและที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน	10
1. วัสดุที่ใช้ทำการทดลอง	10
2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลอง	11
3. ขั้นตอนการทดลอง	13
4. การออกแบบการทดลอง	14
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์	16
1. ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา	16
2. ผลการทดสอบสมบัติทางกล	18
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	19
1. วัตถุประสงค์ของการวิจัย	19
2. สรุปผลการทดลอง	20
3. ข้อเสนอแนะ	21
บรรณานุกรม	22

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การจัดกลุ่มประเภทของทองแดงและทองแดงผสม	7
3.1	แสดงส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทองแดง	11
3.2	แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410	11
3.3	การออกแบบการทดลอง	15
4.1	แสดงความกว้างของรอยต่อ	16



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงแผนภาพแรงกดในกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่	4
2.2	พลังงานของสารจากสภาวะเริ่มต้นไปยังสภาวะสุดท้ายของผลิตภัณฑ์	5
2.3	แสดงกลไกการเกิดการเชื่อมโดยการแพร่	6
2.4	รอยกดและแนวทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์	9
3.1	แสดงเตรียมชิ้นงานเชื่อม	10
3.2	แสดงการจัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ในกรรมวิธีการเชื่อม โดยการแพร่	11
3.3	กล้องจุลทรรศน์และอุปกรณ์บันทึกข้อมูล	12
3.4	เครื่องทดสอบแรงดึง	12
3.5	เครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบไมโครวิกเกอร์	13
3.6	การเตรียมชิ้นงานทดลองเชื่อม	13
4.1	โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชิ้นงานเชื่อม ที่อุณหภูมิ 950 °C	51
4.2	กราฟเปรียบเทียบค่าความความแข็งแรงเนื้อ	52
4.3	กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบความแข็งแรง	53



บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญ

การพัฒนาเทคโนโลยีงานเชื่อมมาใช้ในงานอุตสาหกรรมให้เหมาะสมกับสภาพของงาน และข้อจำกัดในการเชื่อมที่ส่งผลกระทบต่อในด้านต่าง ๆ โลหะก็เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งในการเลือกกระบวนการเชื่อม ซึ่งในการเลือกกระบวนการเชื่อมจึงมีความจำเป็น เพราะอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลลดลง ในปัจจุบันกระบวนการเชื่อมมีอยู่หลายวิธีในการเลือกใช้กระบวนการเชื่อมนั้นจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการผลิตในงานอุตสาหกรรมนั้นๆ การเชื่อมที่ใช้ความร้อนจากการอาร์คเรียกว่า การเชื่อมแบบหลอมละลาย ซึ่งจะมีการแพร่ความร้อนที่ได้จากการอาร์คจะทำให้เกิดการหลอมละลายเข้าด้วยกันของเนื้อโลหะบริเวณบ่อหลอม การหลอมละลายของเนื้อโลหะหลังจากการเชื่อมเมื่อโลหะแข็งตัวจะเกิดโครงสร้างขึ้นมาใหม่ ซึ่งอาจจะไม่เหมือนกับโครงสร้างเดิมของโลหะนั้น เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกล มีความเค้นตกค้าง (Residual stress) และการบิดงอ (Distortion) นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการแตกของรอยเชื่อมในระหว่างการแข็งตัว และมีปัญหาการเกิดโพรงอากาศ (Porosity)

ดังนั้นจึงได้หาวิธีการเชื่อมที่เหมาะสมเพื่อที่จะให้โครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลไว้ให้ใกล้เคียงกับโลหะเดิมมากที่สุดภายหลังจากการเชื่อม โดยการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid State Welding) เป็นกระบวนการเชื่อมที่ยึดโลหะเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะนั้น โดยที่โลหะยังอยู่ในสภาวะของแข็ง ซึ่งโลหะจะเชื่อมติดกันโดยความร้อนบริเวณชิ้นงานเชื่อมต่ำกว่าจุดหลอมเหลว สำหรับการเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Bonding) ซึ่งกระบวนการเชื่อมโดยการแพร่ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่น้อยมาก เพราะใช้หลักการแพร่ของอะตอมเมื่อได้รับความร้อน พร้อมกับแรงกดในขณะที่เชื่อม จากนั้นให้เวลาในช่วงหนึ่งเพื่อให้เกิดการเชื่อมติดกันของวัสดุที่จะเชื่อม กระบวนการเชื่อมโดยการแพร่ จะมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมดังนี้คือ แรงกดขณะเชื่อม (Contact pressure) เวลาในการกดแช่ (Holding time) อุณหภูมิในการเชื่อม (Temperature) และบรรยากาศ (Atmosphere) จากข้อมูลและเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นที่มาของโครงการวิจัยนี้โดยจะศึกษาตัวแปรในการเชื่อม ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลโดยเฉพาะของเนื้อเชื่อม (Weld Metal) และบริเวณที่มีผลกระทบต่ออันเนื่องมาจากความร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) โดยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Bonding) เพื่อความเหมาะสมทางด้านโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติ

ทางกล และนำผลมาปรับปรุงเพื่อเลือกใช้กรรมวิธีการเชื่อมที่เหมาะสมทั้งในแง่งานวิจัยและอุตสาหกรรมต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อหาเทคนิคการเชื่อมที่เหมาะสมในการเชื่อม โดยโครงสร้างของวัสดุหลังจากการเชื่อมใกล้เคียงกับโครงสร้างเดิมก่อนทำการเชื่อม

2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรในการเชื่อมโดยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Bonding)

2.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของวัสดุหลังจากการเชื่อมโดยการแพร่

3. ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของโครงการวิจัยนี้จะศึกษาการเชื่อมโลหะด้วยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Bonding) โดยทำการเชื่อมในบรรยากาศปกติและภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ที่อุณหภูมิในการให้ความร้อน 800 850 900 และ 950°C ใช้เวลาในการกดแช่ 1 ชั่วโมง โดยมีแรงกดที่ 12 MPa และศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยา โครงสร้างทางมหภาค (Macrostructure) โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) และศึกษาสมบัติทางกลของแนวเชื่อมและบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากการเชื่อม

4. ประโยชน์ที่ว่าจะได้รับ

4.1 ทราบถึงผลของตัวแปรในกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Bonding) ที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของรอยต่อทองแดงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410

4.2 โครงสร้างทางจุลภาคของรอยต่อทองแดงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410 หลังจากการเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Bonding) รักษาโครงสร้างเดิมของวัสดุมากที่สุด

4.3 ทราบถึงความเป็นไปได้และค่าตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสม สำหรับการการเชื่อมต่อทองแดงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Bonding) เพื่อประโยชน์ทางด้านงานวิจัยและอุตสาหกรรมสำหรับโลหะประเภทนี้ต่อไป

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

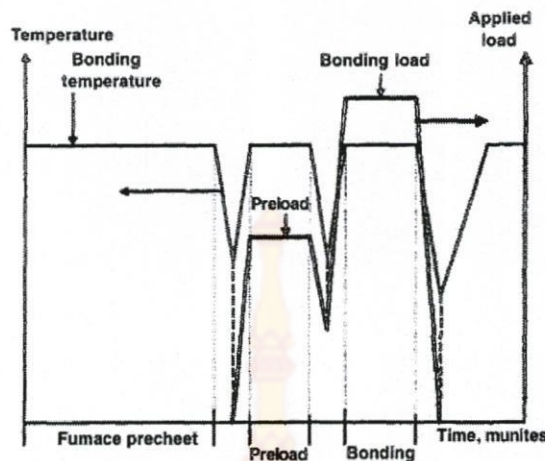
ในการศึกษาการเชื่อมต่อทองแดงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410 โดยการแพร่ ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาหลักการและทฤษฎีต่าง ๆ เพื่อให้บรรลุตรงตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ โดยมีทฤษฎีและหลักการดังนี้

1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A. Urena, J.M. Gomez de SalaZar. 1993. [2] ได้นำอะลูมิเนียมเกรด AA2124 และ AA8090 ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมาเชื่อมต่อด้วยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ การเชื่อมชิ้นงานมีความหนา 6 มิลลิเมตร อุณหภูมิในการให้ความร้อน (Temperature) 470-520 °C เวลาในการกวดแช่ (Holding time) 60 นาที มีแรงกด (Contact pressure) ที่ 6 MPa การเชื่อมควบคุมให้อยู่ภายใต้สูญญากาศที่ 2×10^{-4} Torr. ปรากฏว่าธาตุลิเทียมผสมอยู่ในอะลูมิเนียมเกรด AA8090 ช่วยทำลายฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ได้ ช่วยในการยึดติดที่ดีขึ้น

Anne Sunwoo, Reynold Lum. 1995. [3] ได้ทำการทดลองอะลูมิเนียมเกรด 7475 ที่เชื่อมต่อด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย ถูกเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ ในการทดลองเชื่อมใช้ตัวแปร อุณหภูมิ 510 °C แรงกดที่ใช้มีค่าต่ำกว่า 1.4 MPa โดยมีความเร็วในการกวดที่อัตรา 2×10^{-4} s⁻¹ มีการเตรียมชิ้นงานเชื่อมที่ความหนา 3 มิลลิเมตร ซึ่งในการเชื่อมมีการเชื่อมภายใต้บรรยากาศอาร์กอน พบว่าที่แรงกด 0.55 MPa เริ่มให้ค่าความเครียด และฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ส่งผลอย่างมากต่อการเชื่อมอะลูมิเนียมเกรด 7475 จึงมีการเชื่อมภายใต้บรรยากาศอาร์กอนจะช่วยลดฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผิวอะลูมิเนียมในขณะการเชื่อม

C.S. Lee, H. Li, R.S. Chandel. 1999. [4] ได้ทำการเชื่อมอะลูมิเนียม 6061 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 กับโลหะผสม (MMC) โดยอะลูมิเนียม 6061 มีขนาดอนุภาค 28 μm และโลหะผสมมีขนาดอนุภาค 42 μm ในการทดลองใช้อุณหภูมิ 450 °C แรงกดที่ 10.69 MPa เวลาที่ใช้ในการกวดแตกต่างกัน โดยการเชื่อมให้อยู่ในบรรยากาศทั่วไปเพื่อลดข้อจำกัดในการเชื่อมขนาดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่และ ลดราคาแพงในการเชื่อมในสภาวะสูญญากาศ โดยการทำลายและสลายชั้นออกไซด์และรักษาผิวอินเตอร์เฟซที่สะอาดในระหว่างการแพร่พันธะ ด้วยวิธีการให้แรงกดที่แตกต่างกันในขณะเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 7 เพื่อรักษาผิวเชื่อมและทำลายชั้นออกไซด์ที่เคลือบผิวเชื่อม ซึ่งหลังจากการเชื่อมปรากฏว่าประสิทธิภาพการยึดติดหลังจากการเชื่อมสูงถึง 75 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพแรงกดในกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ [4]

A.S. Zuruzi, H. Li, G. Dong. 1999. [5] ได้มีการพยายามเชื่อมโดยการแพร่อะลูมิเนียมในสภาวะบรรยากาศทั่วไป โดยมีการศึกษาความราบเรียบของผิวเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมอะลูมิเนียมเกรด 6061 ในการทดลองจะเชื่อมในสภาวะของบรรยากาศอากาศทั่วไปทำภายในเตาอบขึ้นงาน ซึ่งมีการใช้อุณหภูมิ 450°C แรงกดที่ 8.08 MPa เวลาที่ใช้ในการกดแช่ 30, 45, 60, 75, และ 90 นาที ขนาดชิ้นงานที่เชื่อมมีขนาด 15.8×15.8 มิลลิเมตร มีการเตรียมผิวขึ้นงานที่กระดาษทรายเบอร์ P180 grit และ P1000 grit หลังจากการทดสอบสมบัติทางกลพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ P180 grit เวลาในการกดแช่ 75 นาที ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ประสิทธิภาพการยึดติดหลังจากการเชื่อม 76 เปอร์เซ็นต์

P. He, X. Yue, J.H. Zhang. 2008. [6] มีการนำกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่มาเชื่อมต่อวัสดุที่ต่างชนิดกัน โดยมีการเชื่อมไททาเนียมผสม (Ti-6Al-4V) กับเหล็กกล้าไร้สนิม (1Cr18Ni9Ti) และใช้อะลูมิเนียมเป็นตัวประสานในการเชื่อม จากการทดลองครั้งนี้มีการทำภายใต้การควบคุมบรรยากาศให้เป็นระบบสุญญากาศที่ $3 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ ขัดด้วยกระดาษทรายที่เบอร์ 1000 grit โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 450°C ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด การยึดเกาะระหว่างชิ้นไททาเนียมผสมกับเหล็กกล้าไร้สนิมยึดติดดี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 600°C ก็พบว่าการยึดเกาะระหว่างชิ้นไม่ดีส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าต่ำสุด

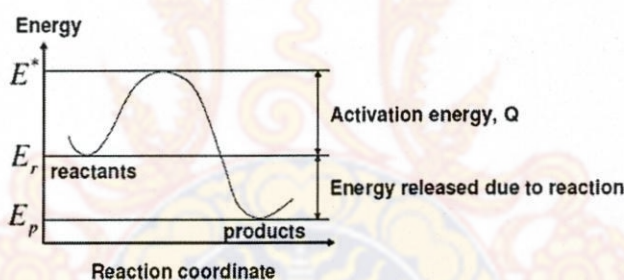
Horng-Yu Wu, Shyong Lee, Jian-Yih Wang. 1998. [7] ได้ทำการการเชื่อมวัสดุหลายชนิดในชิ้นเดียวกันโดยการเชื่อมแพร่ ใช้การอัดขึ้นงานและให้ความร้อนด้วยแผ่นเหล็กที่ร้อนจากด้านล่างชิ้นงาน ในการให้ความร้อนแต่ละครั้งจะใช้เวลาที่แตกต่างกัน ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมี

ความหนา 3 มิลลิเมตร จากการทดลองสรุปได้ว่าเมื่อทดสอบแรงเฉือนพบว่าที่เวลาที่กดอัดไว้ 7 ชั่วโมง รับแรงเฉือนคี่ที่สุดและเมื่อความร้อนยิ่งสูงขึ้นก็ยิ่งทำให้การยึดคดคี่ยิ่งขึ้น

2. ทฤษฎีและที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแพร่ (Diffusion)

การแพร่ (Diffusion) คือ การที่อะตอมของสารหนึ่งเดินทางผ่านเข้าไปในอีกสารหนึ่ง โดยทั่วไปแล้วการเคลื่อนที่ในของแข็งมักถูกจำกัด ยกเว้นแต่เมื่อได้รับพลังงาน เช่น ในรูปของความร้อน ซึ่งจะทำให้อะตอมเกิดการสั่น และเกิดการเคลื่อนที่หรือการจัดตำแหน่งใหม่ เราเรียกพลังงานที่ทำให้อะตอมเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งว่า พลังงานกระตุ้น (Activation Energy, Q) มีหน่วยเป็น J/mol หรือ cal/mol โดยปกติแล้วอะตอมของสารตั้งต้นมีพลังงานอยู่ในระดับ E_r แต่เมื่อได้รับพลังงานกระตุ้น Q จนทำให้มีระดับพลังงานเป็น E^* จะทำให้อะตอมมีพลังงานเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีระดับพลังงาน E_p ดังแสดงในรูปที่ 2.2



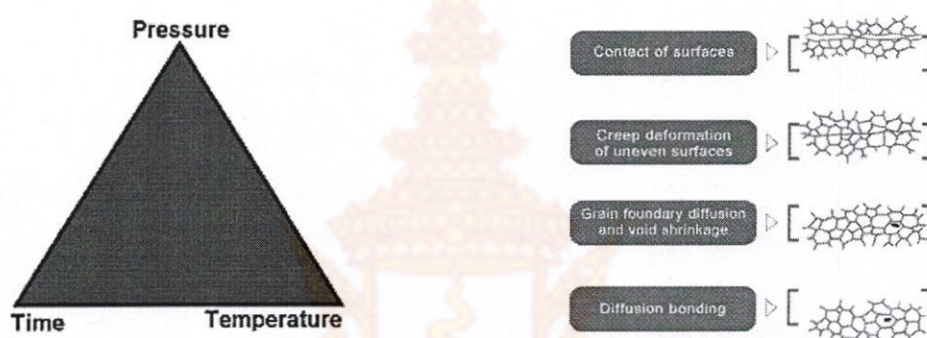
รูปที่ 2.2 พลังงานของสารจากสถานะเริ่มต้นไปยังสถานะสุดท้ายของผลิตภัณฑ์

2.2 กลไกการแพร่

2.2.1 กลไกการแพร่แบบช่องว่างหรือแทนที่ (Vacancy or Substitutional Diffusion Mechanisms) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อะตอมจะมีพลังงานมากขึ้น ทำให้ช่องว่างสามารถเกิดได้มากขึ้น ส่งผลให้อัตราเร็วในการแพร่ของอะตอมแบบช่องว่างหรือแทนที่สูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ อัตราเร็วในการแพร่ยังขึ้นอยู่กับขนาดของอะตอม และพลังงานพันธะระหว่างอะตอม

2.2 กลไกการแพร่แบบแทรก (interstitial diffusion mechanisms) การแพร่แบบแทรก คือการที่อะตอมมีการเคลื่อนที่จากตำแหน่งการแทรกตัวหนึ่งไปยังอีกตำแหน่ง การแทรกตัวหนึ่งที่ว่างอยู่ การแพร่แบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออะตอมที่แพร่มีขนาดเล็กกว่าอะตอมของผลึก เช่น การแพร่ของอะตอมไฮโดรเจน ออกซิเจน คาร์บอน หรือไนโตรเจนในโครงผลึกของโลหะ

2.3 กรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่เป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง สามารถเชื่อมต่อวัสดุได้หลายชนิด เช่น เซรามิก (Ceramic) วัสดุผสม (Composites) เป็นต้น กรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ต้องอาศัยตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ แรงกดขณะเชื่อม เวลาในการกดแช่ และอุณหภูมิในการเชื่อม นอกจากนั้นยังมีตัวแปรอื่นๆ ในการแพร่ เช่น ความราบเรียบของผิวรอยต่อ (Surface Roughness) ความสะอาดของผิวรอยต่อ (Cleaning Surface) เป็นต้น โดยกลไกการเกิดการเชื่อมต่อนี้จะอาศัยการแพร่ของอะตอมระหว่างวัสดุที่เชื่อมต่อกัน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 2.3 แสดงกลไกการเกิดการเชื่อมโดยการแพร่ [1]

แรงกดขณะเชื่อม (Contact pressure) จะใช้แรงกดที่มีค่าต่ำ โดยมีค่าต่ำกว่าค่าความเสียหายของวัสดุ เพื่อป้องกันไม่ให้นำไปสู่การเสียรูปเล็กๆ (Micro deformation) อุณหภูมิในการเชื่อม (Temperature) อุณหภูมิที่ให้ความร้อนในขณะที่เชื่อมอยู่ในช่วง 0.5-0.8 ของจุดหลอมเหลววัสดุที่นำมาเชื่อม (Melting point) เวลาในการกดแช่ (Holding time) เวลาที่ใช้ในการกดแช่จะขึ้นกับอุณหภูมิที่ให้ความร้อนในขณะที่เชื่อมและแรงกดขณะเชื่อม โดยส่วนมากจะขึ้นอยู่กับการศึกษาคิดหลังจากการเชื่อม นอกจากนั้นยังมีปัจจัยอีกมากมายที่ส่งผลต่อกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ โดยฟิล์มออกไซด์ก็ส่งผลให้กรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ไม่ยึดติดได้เช่นกัน ในกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่จึงต้องอาศัยการควบคุมบรรยากาศจากการเชื่อมด้วย โดยในขณะที่เชื่อมต้องควบคุมบรรยากาศให้อยู่ในระบบสุญญากาศหรือบรรยากาศอาร์กอน

2.4 กรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่เป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง สามารถเชื่อมต่อวัสดุได้หลายชนิด โดยกลไกการเกิดการเชื่อมต่อนี้จะอาศัยการแพร่ของอะตอมระหว่างวัสดุที่เชื่อมต่อกัน ดังแสดงในสมการที่ 1

$$D = Ae^{-\frac{Q}{RT}} \quad (1)$$

เมื่อ

D = Diffusion coefficient (cm^2), minus sign expresses a negative gradient

T = Temperature in degrees Kelvin

R = Gas constant

A = Constant dependent on atomic vibration frequency, the entropy state, correlation of jumps and other factors

Q = Activation energy for diffusion

2.5 ทองแดงและทองแดงผสม

ทองแดง เป็นโลหะชนิดแรกที่ถูกค้นพบและนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุดของมนุษยชาติ ทองแดงที่มีสีเหลือง-แดงเป็นสุดยอดวัสดุที่มีความเหนียว (Extremely Ductile) ที่มีโครงสร้างผลึก (Crystal Structure) รู้จักในนาม Face-Center-Cubic หรือ FCC มีค่าสื่อนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ที่ 97% ดีสุดเป็นอันดับสองรองจากโลหะ เงิน (Silver) มีค่าสื่อนำความร้อน (Thermal Conductivity) ที่สูงมากใกล้เคียง เงิน และทองคำ (Gold) ปัจจุบันมีทองแดงผสมอัลลอยต่าง ๆ เกือบ 400 ชนิดขึ้นอยู่กับ ลักษณะการใช้งาน เช่น เส้น (Rods), แผ่นหนา บาง เส้น ท่อ ซึ่งจะผ่านกระบวนการบีบอัด (Extrusions) แผ่นฟอยล์ (Foils), ชนิดที่ผ่านกระบวนการทุบขณะร้อน (Forgings) แบบเส้นลวด (Wires) และการหล่อ (Casting) จากโรงงานหล่อโลหะต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจัดกลุ่มประเภทของทองแดงและทองแดงผสม

Family	Principal alloying element	UNS numbers
Copper alloys, brass	Zinc (Zn)	C1xxxx–C4xxxx, C66400–C69800
Phosphor bronze	Tin (Sn)	C5xxxx
Aluminium bronzes	Aluminium (Al)	C60600–C64200
Silicon bronzes	Silicon (Si)	C64700–C66100
Copper nickel, nickel silvers	Nickel (Ni)	C7xxxx

2.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

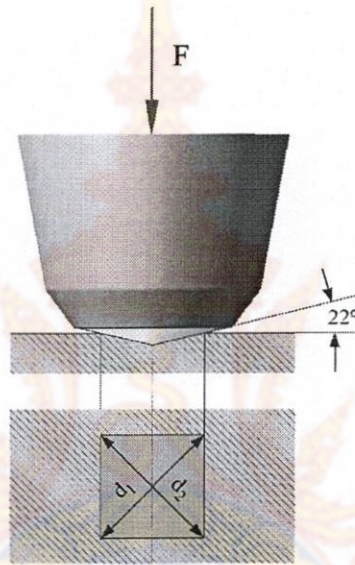
การตรวจสอบทางโลหะวิทยาอาจต้องใช้ร่วมกับการตรวจสอบด้วยสายตา เช่น การส่องดูด้วยแว่นขยายหรือกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่า หรือ ตรวจสอบด้วยตาเปล่า เพื่อดูโครงสร้างมหภาคหรือลักษณะรอยเชื่อม หรือตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายสูงกว่า 10 เท่า การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะโดยทั่วไปสามารถตรวจสอบได้ 2 วิธี คือ การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) การตรวจสอบโครงสร้างทั้ง 2 วิธีดังกล่าวนี้ ก็เพื่อต้องการทราบอิทธิพลของธาตุผสมในโลหะที่ทำการตรวจสอบนั้น ๆ อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการกระทำทางความร้อน สิ้นสุดลงอีกด้วย ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างสามารถนำไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วน เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสมดังได้กล่าวแล้วว่า การตรวจสอบโครงสร้างนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี ซึ่งการตรวจสอบแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันโดยมีรายละเอียด ดังนี้ การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนี้ เป็นการตรวจสอบโครงสร้างด้วยการมองด้วยตาเปล่า หรือ ถ้าใช้กล้องขยายก็มีกำลังขยายไม่เกิน 50 เท่า การเตรียมชิ้นงานเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค นั้น ไม่ยุ่งยาก เพราะว่าเป็นการตรวจสอบรูปทรงภายในของโลหะ การแยกชิ้นของผลึก รอยร้าว รอยแตก หน้าตัดที่ถูกดึงจนขาด และปริมาณธาตุผสมในโลหะของชิ้นงาน

2.7 การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) เป็นการทดสอบการวัดความแข็งที่มีความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นงานทดสอบ การทดสอบความแข็งที่นิยมใช้กับงานเชื่อมคือการทดสอบแบบวิกเกอร์ (Vickers) เนื่องจากการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์จะเหมาะสำหรับการวัดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อม โดยในการวัดความแข็งจะใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศาเป็นเวลา 10 - 15 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว สามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมากที่สุดที่ค่าความแข็งประมาณ 5 กิโลกรัมแรงต่อตารางมิลลิเมตร (kgf/mm^2) จนถึงโลหะที่แข็งมาก ๆ ประมาณ 1500 กิโลกรัมแรงต่อตารางมิลลิเมตร โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 กิโลกรัมแรง (kgf) ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ

$$HV = \frac{1.854P}{d^2} \quad (2.1)$$

โดยที่ HV คือ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (kgf/mm²)
 P คือ แรงกด (kgf)
 d คือ ขนาดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 เฉลี่ย (mm)



รูปที่ 2.4 รอยกดและแนวทศสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ [12]

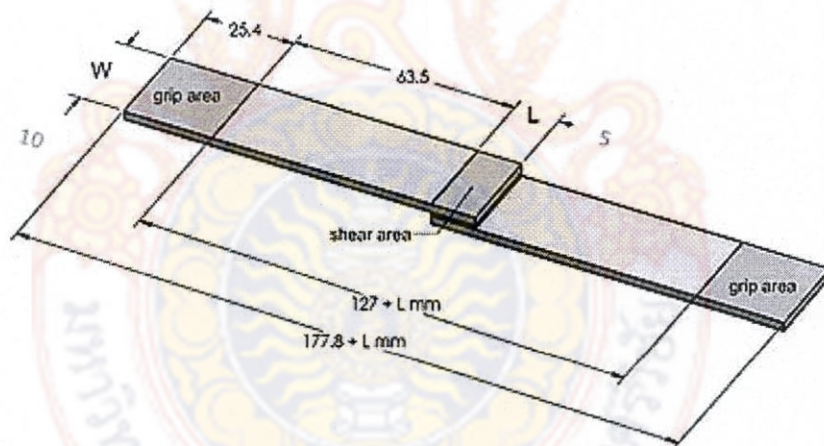
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาการเชื่อมต่อทองแดงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410 โดยการแพร่ ในการดำเนินการวิจัยนั้นจะทำการเตรียมงานเชื่อมตามมาตรฐาน ASTM D 1002 โดยทำการเชื่อมแพร่ แล้วนำชิ้นงานเชื่อมดังกล่าวไปศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา และสมบัติทางกล ดังนั้นจึงได้กำหนดวิธีการดำเนินการวิจัย ดังนี้

1. วัสดุที่ใช้ทำการทดลอง

การวิจัยนี้ใช้กรรมวิธีการเชื่อมแพร่ (Diffusion Welding) โดยใช้วัสดุทองแดง ตามมาตรฐาน ASTM C1100 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410 เป็นชิ้นงานทดลองเชื่อม กำหนดรอยต่อเป็นแบบต่อเกลย โดยเตรียมงานตามมาตรฐานงานเชื่อม ASTM D1002



รูปที่ 3.1 แสดงเตรียมชิ้นงานเชื่อม

ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทองแดง

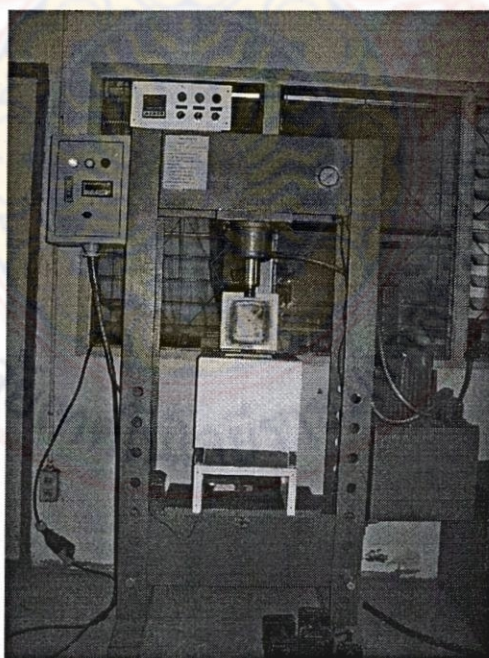
Material	Chemical Composition (%)						
	Cu	Pb	Fe	Sn	Zn	P	Cu+Sn+P
C1100	99.90 Min	-	-	-	-	-	-
C1201	99.90 Min	-	-	-	-	0.004~0.015	-
C1220	99.90 Min	-	-	-	-	0.015~0.040	-
C1221	99.75 Min	-	-	-	-	0.004~0.040	-

ตารางที่ 3.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni
0.15 max	1.00 max	0.040 max	0.030 max	1.00 max	11.00/14.00	1.00 max	1.00 max

2. เครื่องมือ วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.1 จัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ในกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Bonding) โดยจะใช้เครื่องอัดในการอัดชิ้นงาน (Compression Machine) และให้ความร้อนระบบปิดโดยให้อยู่ในตู้ควบคุมความร้อน โดยชิ้นงานยึดติดกับฐานรองชิ้นงาน รวมไปถึงจัดทำอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน นอกจากนี้จะใช้โปรแกรมในการควบคุมแรงกดของเครื่องอัดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 3.2 แสดงการจัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ในกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่

2.2 ศึกษาคุณสมบัติทางโลหะวิทยา (Metallurgical Investigation) หลังจากทำการเชื่อมแล้ว จะนำชิ้นงานมาทำการศึกษาในแง่ของโลหะวิทยาการเชื่อม เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างทางมหภาค โครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ เครื่องหมายการค้า Zeiss รุ่น AX10 Imager A1m เป็นเครื่องมือสำหรับดูโครงสร้างมหภาคและจุลภาค ประกอบด้วยส่วนหลักๆ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นกล้องจุลทรรศน์และส่วนที่เป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูล แสดงในรูปที่ 4



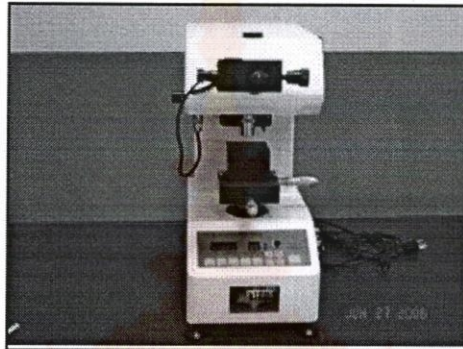
รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์และอุปกรณ์บันทึกข้อมูล

2.3 ทำการศึกษาเพื่อหาค่าสมบัติทางกล (Mechanical properties) โดยทำการทดสอบหาค่าความแข็ง บริเวณรอยต่อและทำการทดสอบแรงเฉือนของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ เครื่องหมายการค้า Testometric รุ่น M500-50kN เป็นเครื่องมือสำหรับทดสอบแรงเฉือนของงานเชื่อม แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบแรงดึง

2.4 เครื่องทดสอบความแข็ง เป็นเครื่องทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งของชิ้นทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส (Micro Vickers) เครื่องหมายการค้า Controls Digital รุ่น DM 2 สามารถอ่านผลการทดสอบจากเครื่องโดยตรงเป็นตัวเลขดิจิทัล การวัดความแข็งจะใช้หัวกดเพชรที่มีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา โดยในงานวิจัยครั้งนี้ใช้ทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งของงานเชื่อม แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การตัดชิ้นงานเชื่อมที่ต้องการตรวจสอบโครงสร้าง ขนาดของชิ้นงานที่ตรวจสอบกำหนดให้ขนาด $10 \times 93.90 \times 3$ มิลลิเมตร ขัดผิวชิ้นงานขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150 220 500 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 3.6 การเตรียมชิ้นงานทดลองเชื่อม

ใช้เวลาในการกดแช่ 1 ชั่วโมง โดยมีแรงกดที่ 12 MPa โดยทำการเชื่อมในบรรยากาศปกติ ดังแสดง
ตารางที่ 1

ตารางที่ 3.3 การออกแบบการทดลอง

บรรยากาศในการเชื่อม	อุณหภูมิ (°C)				เวลากดแช่ (ชม.)	แรงกด(MPa)
	800	850	900	950		
ปกติ	800	850	900	950	1	12
ก๊าซอาร์กอน	800	850	900	950	1	12



บทที่ 4 ผลการวิจัย

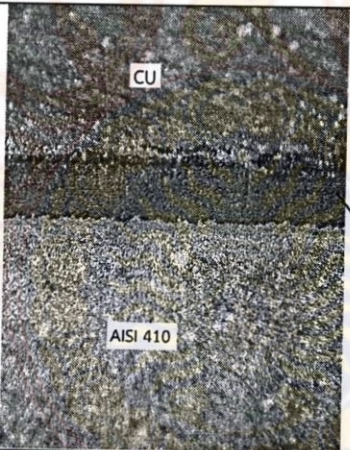
การวิจัยครั้งนี้เป็นการเชื่อมต่อทองแดงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410 โดยการแพร่ โดยผู้วิจัยจะกล่าวถึงผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลของการวิจัย ดังนี้

1. ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

3.1 การตรวจสอบโครงสร้างแบบมหภาค

ผลการทดลอง จะพิจารณาจากลักษณะรูปร่างทางกายภาพของแนวเชื่อม ได้แก่ ความกว้างของต่อของรอยเชื่อมที่อุณหภูมิในการเชื่อม 800 850 900 และ 950 °C แสดงตาราง 4.1 ซึ่งวิเคราะห์ผลจากโครงสร้างมหภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 5 เท่า

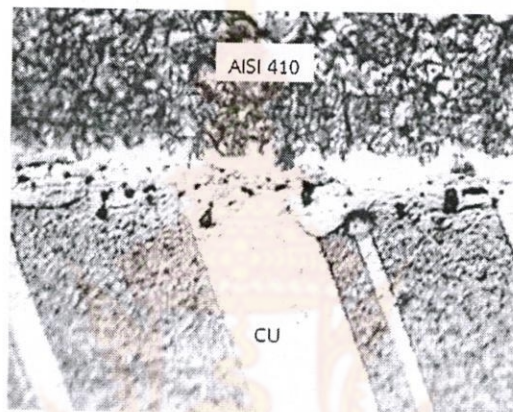
ตารางที่ 4.1 แสดงความกว้างของรอยต่อ



บรรยากาศในการเชื่อม	ความกว้างของต่อที่อุณหภูมิ (μm)			
	800°C	850°C	900°C	950°C
ปกติ	50	58	62	65
ก๊าซอาร์กอน	51	59	63	67

3.2 การตรวจสอบโครงสร้างแบบจูลภาค

การวิจารณ์ผลการตรวจสอบโครงสร้างแบบจูลภาค จะพิจารณาจากลักษณะเกรนบริเวณรอยต่อ การวิเคราะห์ผลจากลักษณะโครงสร้างจูลภาคจะใช้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 20 เท่า แสดงในรูปที่ 9 การเชื่อมด้วยโดยการแพร่ พบว่า ให้ผลโครงสร้างจูลภาคที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า การแพร่ของทองเหลืองแพร่ได้ดี เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการเป็นเนื้อเดียวกันจ่อมมีมากขึ้นแต่ในขณะเดียวกันขนาดเกรนจะมีความแตกต่างกัน

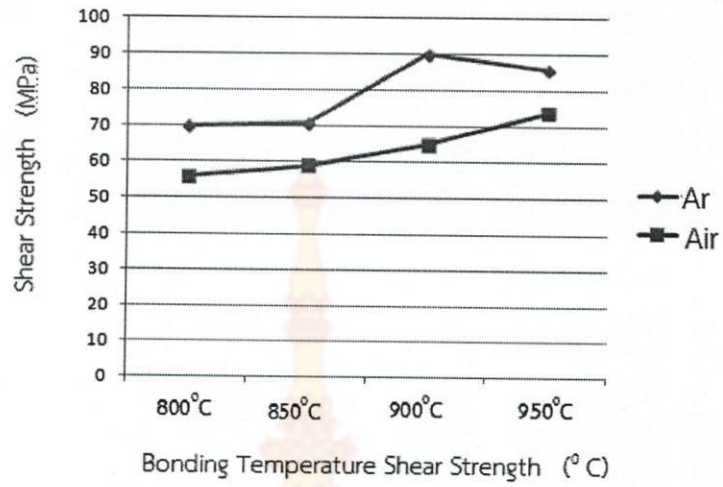


รูปที่ 4.1 โครงสร้างจูลภาคของรอยต่อชิ้นงานเชื่อม ที่อุณหภูมิ 950 °C

2. ผลการทดสอบสมบัติทางกล

2.1 ผลการทดสอบแรงเฉือน

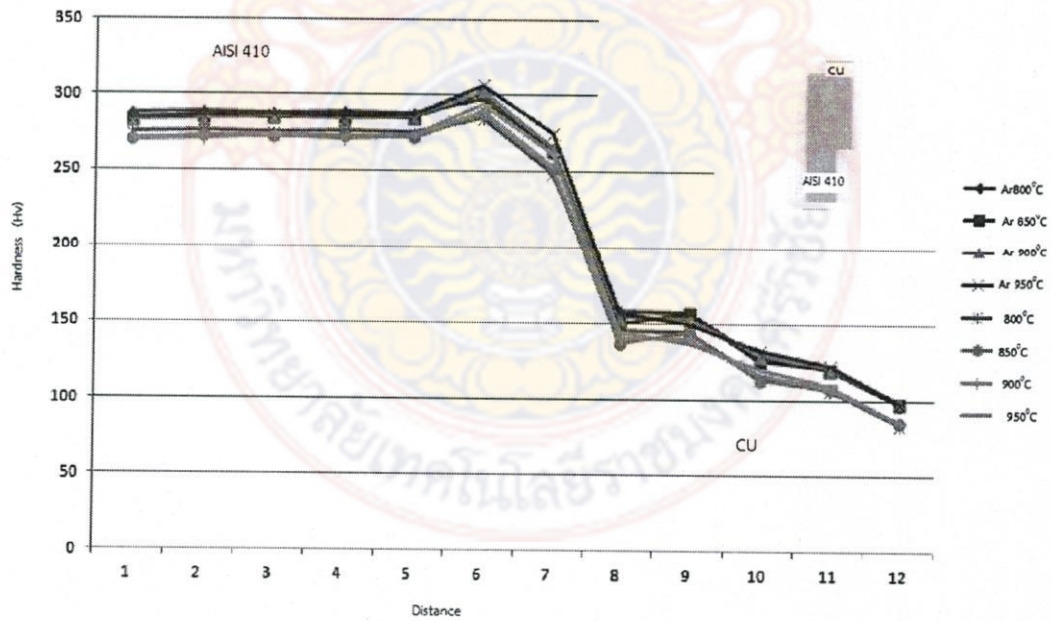
พิจารณาการเชื่อมโดยกระบวนการแพร่ จะพบว่าที่อุณหภูมิ 800 °C จะให้ค่าความแข็งแรงเฉือนต่ำสุด 56 MPa ที่บรรยากาศในการเชื่อมปกติ และ 60 MPa ที่บรรยากาศในการเชื่อมที่ปกคลุมด้วยอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 850 °C จะให้ค่าความแข็งแรงเฉือน 59 MPa ที่บรรยากาศในการเชื่อมปกติ และ 71 MPa ที่บรรยากาศในการเชื่อมที่ปกคลุมด้วยอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 900 °C จะให้ค่าความแข็งแรงเฉือน 65 MPa ที่บรรยากาศในการเชื่อมปกติ และ 90 MPa ที่บรรยากาศในการเชื่อมที่ปกคลุมด้วยอาร์กอน และที่อุณหภูมิ 900 °C จะให้ค่าความแข็งแรงเฉือน 74 MPa ที่บรรยากาศในการเชื่อมปกติ และ 86 MPa ที่บรรยากาศในการเชื่อมที่ปกคลุมด้วยอาร์กอน แสดงในรูปที่ 4.2 หมายความว่า การเชื่อมโดยการแพร่จะให้ค่าความแข็งแรงเฉือนสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่รูปร่างอาจมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่คงรูปเดิม แต่เมื่อเปรียบเทียบกับบรรยากาศในการเชื่อม พบว่า บรรยากาศในการเชื่อมที่ปกคลุมด้วยอาร์กอนจะให้ค่าที่สูงกว่า



รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบค่าความความแข็งแรงเชื่อม

2.2 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

จากทดสอบความแข็งบริเวณรอยต่อพบว่าจากผิวนอกของงานจนเข้าใกล้รอยต่อ จะให้ค่าความแข็งที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบความแข็ง

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการเชื่อมต่อทองแดงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410 โดยการแพร่ สามารถสรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะได้ดังนี้

1. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.1 เพื่อหาเทคนิคการเชื่อมที่เหมาะสมในการเชื่อม โดยโครงสร้างของวัสดุหลังจากการเชื่อมใกล้เคียงกับโครงสร้างเดิมก่อนทำการเชื่อม
- 1.2 เพื่อศึกษาตัวแปรในการเชื่อมโดยกรรมวิธีการเชื่อมโดยการแพร่ (Diffusion Bonding)
- 1.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของวัสดุหลังจากการเชื่อมโดยการแพร่

2. สรุปผลการทดลอง

2.1 การเชื่อมต่อทองแดงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410 โดยการแพร่ พบว่าลักษณะรูปร่างทางกายภาพของแนวเชื่อม ได้แก่ ความกว้างของต่อของรอยเชื่อมที่เกิดจากการแร่ ที่อุณหภูมิในการเชื่อม 800 850 900 และ 950 °C มีความกว้างจากการแพร่ของต่อของรอยเชื่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและที่บรรยากาศในการเชื่อมที่ปกคลุมด้วยแก๊สอาร์กอนจะมีการแพร่ดีกว่า

2.2 การตรวจสอบ โครงสร้างแบบจุลภาค บริเวณรอยต่อพบว่าการแพร่ของทองแดงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการแพร่เพิ่มมากขึ้นแต่วัสดุทั้งสองจะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

2.3 ค่าความแข็งแรงเฉือนพบว่าที่ค่าความแข็งแรงเฉือนให้ค่าความแข็งแรงเฉือนสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่รูปร่างอาจมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่คงรูปเดิม

2.4 ค่าความแข็งบริเวณรอยต่อพบว่าจากผิวนอกเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410เข้าสู่แดงกับเข้าใกล้รอยต่อจะให้ค่าความแข็งที่สูงขึ้น

3. ข้อเสนอแนะ

การเชื่อมต่อแดงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 410 ด้วยการแพร่ควรทำศึกษาตัวแปรอื่น ๆ เช่น เวลาในการแพร่ ลักษณะการขึ้นตัว การออกแบบรอยต่อ และการเลือกแก้สปกคลุม หรือ สภาวะสุญญากาศ



บรรณานุกรม

- [1] A. Urena, J.M. Gomez de SalaZar. 1993. Bonding of aluminium matrix composites for application in the transport industry. Vol 3.
- [2] Anne Sunwoo, Reynold Lum. 1995. SUPERPLASTIC DEFORMATION ENHANCED DIFFUSION BONDING OF ALUMINUM ALLOY 7475. Vol. 33, No. 4, pp. 639-644.
- [3] C.S. Lee, H. Li, R.S. Chandel. 1999. Vacuum-free diffusion bonding of aluminium metal matrix composite. pp. 326-330.
- [4] A.S. Zuruzi, H. Li, G. Dong. 1999. Effects of surface roughness on the diffusion bonding of Al alloy 6061 in air. pp. 244-248.
- [5] P. He, X. Yue, J.H. Zhang. 2008. Hot pressing diffusion bonding of a titanium alloy to a stainless steel with an aluminum alloy interlayer. pp. 171-176.
- [6] Horng-Yu Wu, Shyong Lee, Jian-Yih Wang. 1998. Solid-state bonding of iron-based alloys, steel-brass, and aluminum alloys. pp. 173-179.

