อิทธิพลของกระแสเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของแนวแล่นประสานเหล็กชุบสังกะสีจากการแล่นประสานในกระบวนการเชื่อมมิก

ธิติวัฒน์ วัฒนศรีสิน[1] ตรีเนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ[2] และ อภิชาติ โรจนโรวรรณ[1*]

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้เป็นผลของอิทธิพลของกระแสเชื่อม (ในช่วง 70 75 80 85 90 และ 95 แอมป์) ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค ของแนวแล่นประสานเหล็กชุบสังกะสีด้วยลวดเติมทองแดงซิลิคอน โดยใช้กระบวนการแล่นประสานด้วยกระบวนการเชื่อมมิก พบว่าเมื่อใช้กระแสเชื่อมสูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการแทรกตัวของลวดเติมไปยังช่องว่างรอยต่อเพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างจุลภาคของแนวแล่นประสานถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าเกิดการตกตะกอนของเฟสสารประกอบกึ่งโลหะ ($Fe_5Si_3(Cu)$) กระจายทั่วไปในเนื้อพื้น และพบว่าขนาดของเฟส $Fe_5Si_3(Cu)$ เพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของเฟส $Fe_5Si_3(Cu)$ ในแนวแล่นประสานเป็นผลให้ค่าความแข็งของแนวแล่นประสานเพิ่มขึ้น และความแข็งแรงของแนวแล่นประสานในทุกกระแสเชื่อม มีความแข็งแรงที่สูงกว่าตัวแผ่นเหล็กชุบสังกะสีในการทดลอง

คำสำคัญ : เหล็กชุบสังกะสี ลวดเติมทองแดงซิลิคอน แล่นประสาน การเชื่อมมิก สมบัติทางกล

---

[1] ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

[2] ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

[*] ผู้ติดต่อ, อีเมล์: fengacrw@ku.ac.th รับเมื่อ 23 พฤษภาคม 2559 ตอบรับเมื่อ 28 กันยายน 2559

Effects of MIG welding Current in Brazing Process on Mechanical Properties and Microstructure of Galvanized Steel Brazing Seam

Titiwat Wattanasrisin[1], Trinet Yingsamphancharoen[2] and Aphichart Rodchanarowan[1*]

Abstract

In this study, the effects of welding currents (ranged from 70, 75, 80, 85, 90 and 95 Amp) on mechanical properties and microstructure of brazing seam from galvanized steel with Copper-Silicon filler by MIG brazing process were reported. It was found that higher welding currents increased the ability of filler penetration into the gap. According to the Microstructures of brazing seam using scanning electron microscopy (SEM), there was precipitation of intermetallic phase (Fe_5Si_3(Cu)) distributed all over the matrix; while enlargement of Fe_5Si_3(Cu) was detected at higher welding currents. The presence of the Fe_5Si_3(Cu) in the brazing seam resulted in an increase in hardness. The strength of brazing seam from every welding current was higher than as-received galvanized steel coupon.

Keywords : Galvanized Steel, Copper-Silicon filler, Brazing, MIG welding, Mechanical Property

[1] Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 50 Ngamwongwan Road, Chatuchak, Bangkok, Thailand 10900

[2] Department of Welding Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

[*] Corresponding Author, E-mail: fengacrw@ku.ac.th Received 23 May 2016, Accepted 28 September 2016

1. บทนำ

ในปัจจุบันเหล็กชุบสังกะสีถูกใช้งานเป็นอย่างมากทางด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ยานยนต์ โครงสร้าง เป็นต้น แต่ด้วยข้อจำกัดคือชั้นเคลือบสังกะสีจะเกิดระเหยออกจากผิววัสดุจากการเชื่อมประกอบ ทางอุตสาหกรรมจึงหันมาใช้เทคนิคการเชื่อมประกอบแบบแล่นประสานเหล็กชุบสังกะสีโดยใช้กระบวนการเชื่อมมิก เพื่อเป็นการลดปัญหาดังกล่าว อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานในด้านการต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ (กระแสเชื่อม แรงดันอาร์ค ระยะห่างรอยต่อ แก๊สปกคลุม และอื่นๆ) ในการแล่นประสานของกระบวนการเชื่อมมิก จะส่งผลต่อสมบัติต่างๆของแนวแล่นประสาน [1-2] ทั้งด้านความแข็งแรงทางดึง ความแข็ง รวมไปถึงระยะการยืดตัวของแนวแล่นประสาน

ตัวอย่างเช่น เมื่อกระแสเชื่อมในการแล่นประสานเพิ่มขึ้นจะส่งต่อระยะการแทรกตัวของลวดเติมในอะลูมิเนียม และเหล็กชุบสังกะสี ด้วยกระบวนการแล่นประสานด้วยเลเซอร์ จะทำให้แนวแล่นประสานมีความแข็งแรงทางดึงและความแข็งเพิ่มขึ้น [3-5]

โดยเมื่อตัวแปรของกระแสเชื่อมในกระบวนการเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้นในการแล่นประสานและการหลอมเหลวของลวดเติม ซึ่งลวดเติมประเภทหนึ่งที่เป็นที่นิยมในการแล่นประสานได้แก่ ลวดเติมทองแดงซิลิคอน เนื่องจากมีการไหลที่ดีและให้ความแข็งแรงที่สูง [6-7] และแนวแล่นประสานของลวดเติมชนิดนี้เมื่อเย็นตัวจะเกิดการตกตะกอนของเฟส $Fe_5Si_3(Cu)$ [3, 8-9] เป็นสารประกอบกึ่งโลหะ ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทางกลของแนวแล่นประสานอีกด้วย

ดังที่ได้กล่าวข้างต้น การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในกระบวนการแล่นประสานจะส่งผลต่อคุณภาพของงานแล่นประสาน และโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลง สำหรับเหล็กชุบสังกะสีที่แล่นประสานด้วยลวดเติมทองแดงซิลิคอน ในการแล่นประสานด้วยการเชื่อมมิกยังไม่ถูกศึกษา ในแง่ของสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคมากนัก

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นผลที่เกิดขึ้นจากกระแสเชื่อมในระบบลวดเติมทองแดงซิลิคอน ที่แล่นประสานบนเหล็กชุบสังกะสี ในการแล่นประสานด้วยการเชื่อมมิกต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ สารเคมี และการเตรียมชิ้นงาน

ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กชุบสังกะสี และลวดเติมทองแดงซิลิคอน ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยเหล็กชุบสังกะสีค่าความแข็งแรงทางดึงที่ 333 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ 44 % สำหรับกรดที่ใช้ในการกัดเปิดผิว เป็นกรดไนตริกความเข้มข้น 20% โดยปริมาตร (ความเข้มข้น 70% โดยปริมาตร HNO_3: J.T. Baker)

เหล็กชุบสังกะสีที่ใช้ในการแล่นประสาน มีความหนา 1.2 มิลลิเมตร ตัดให้ได้ความยาว 160 มิลลิเมตร และกว้าง 120 มิลลิเมตร โดยมีความหนาของชั้นเคลือบสังกะสี 40 ไมโครเมตร หลังจากการตัดทุกชิ้นงานถูกทำความสะอาดผิวด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและคราบน้ำมัน และลวดเติมที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของแผ่นเหล็กชุบสังกะสี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

Mn (%)	C (%)	P (%)	Si (%)	S (%)	Fe (%)
0.18	0.04	0.019	0.01	0.01	Bal.

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเติมทองแดงซิลิคอน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

Si (%)	Mn (%)	Zn (%)	Sn (%)	Fe (%)	Pb (%)	Al (%)	Cu (%)
2.80-4.00	1.50	1.00	1.00	0.50	0.02	0.01	Bal.

2.2 การแล่นประสาน

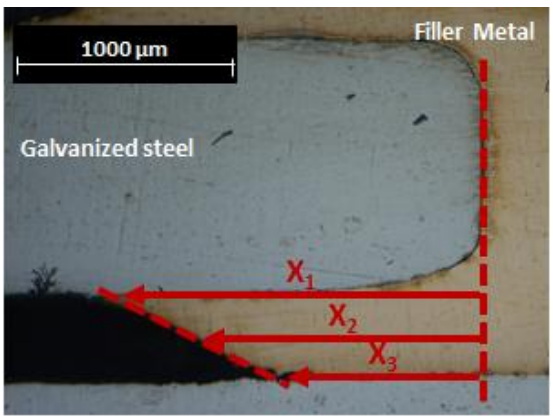
ก่อนจะทำการแล่นประสาน เหล็กชุบสังกะสีสองแผ่นถูกนำมาต่อเกยกันโดยให้มีระยะต่อเกย 10 มิลลิเมตร (ต่อเกยทางด้านกว้าง) และระยะห่างช่องว่างรอยต่อถูกควบคุมด้วยฟิลเลอร์เกจไว้ที่ 0.5 มิลลิเมตร จากนั้นทำการแล่นประสานด้วยเครื่องเชื่อมมิกแบบอัตโนมัติ (Fronius รุ่น VR 7000 CMT)

โดยใช้ตัวแปรควบคุมดังนี้ 1. ระยะปลายลวดอิสระก่อนการแล่นประสานอยู่ที่ 10 มิลลิเมตร [10] 2. ระยะอาร์ค 1 มิลลิเมตร 3. ตำแหน่งของหัวเชื่อมอยู่ที่มุมงาน 45 องศา 4. มุมเดินของแนวแล่นประสานที่ 90 องศา 5. ใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สปกคลุมและมีอัตราการไหล 20 ลิตรต่อนาที [11] 6. หัวเชื่อมเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 800 มิลลิเมตรต่อนาที และ 7. แรงดันอาร์คคงที่ 2.1 โวลต์

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของกระแสเชื่อมต่างๆในการแล่นประสานดังนี้ 70 แอมป์ 75 แอมป์ 80 แอมป์ 85 แอมป์ 90 แอมป์ และ 95 แอมป์

2.3 การวิเคราะห์การแทรกตัวของลวดเติม

ชิ้นงานที่ได้จากการแล่นประสานจากทุกกระแสเชื่อม จะถูกตัดขวางบริเวณแนวแล่นประสาน หลังจากนั้นจะถูกขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 120 180 240 320 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ และขัดมันด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.3 ไมโครเมตร จากนั้นทำการวัดการแทรกตัวของลวดเติมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Leica รุ่น DM2700M)



รูปที่ 1 ภาพตัดขวางของแนวแล่นประสานจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง แสดงการวัดระยะการแทรกตัวของแนวแล่นประสาน

การวัดระยะการแทรกตัวจะวัดจากขอบของแผ่นสังกะสีด้านบน (เส้นประแนวตั้ง) จนถึงขอบของลวดเติมที่แทรกตัวและวัดจำนวน 3 จุดด้วยกัน คือ ขอบ

ด้านบนของการแทรกตัว (X_1) กึ่งกลาง (X_2) และด้านล่าง (X_3) ดังแสดงในรูปที่ 1 จากนั้นนำมาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของการแทรกตัว ($(X_1+X_2+X_3)/3$)

2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

แนวแล่นประสานที่ได้ในแต่ละกระแสเชื่อม ถูกนำมาตัดขวางและขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 120 180 240 320 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ และขัดมันด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.3 ไมโครเมตร แล้วจึงกัดเปิดผิวเพื่อให้เห็นโครงสร้างจุลภาคของแนวแล่นประสานด้วยกรดไนตริก โดยใช้ความเข้มข้น 20 %โดยปริมาตร กัดเปิดผิวด้วยวิธีการจุ่มเป็นเวลา 90 วินาที จากนั้นนำแนวแล่นประสานที่กัดเปิดผิวแล้วไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Philips รุ่น XL30)

2.5 การวิเคราะห์ความแข็งแรงทางดึง

หลังจากการแล่นประสานแล้ว ในการทดสอบความแข็งแรงทางดึง ชิ้นงานถูกเตรียมจากบริเวณช่วงกลางของแนวแล่นประสานให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D 1002-10 [7, 12] ด้วยเครื่องไวท์คัท (Wire Cut) และถูกทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ (Instron รุ่น 5969) โดยให้แรงดึงตามความยาวของชิ้นงาน กำหนดให้ระยะเกจอยู่ที่ 137 มิลลิเมตร และใช้ความเร็วในการดึงที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาที โดยในแต่ละกระแสเชื่อมถูกทดสอบจำนวน 3 ชิ้น

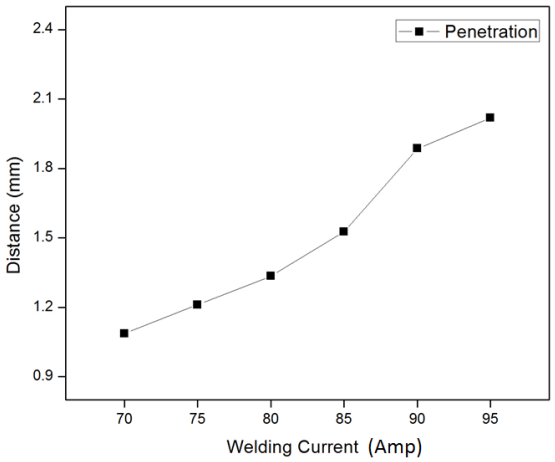
2.6 การวิเคราะห์ความแข็งแนวแล่นประสาน

แนวแล่นประสานที่ได้ในแต่ละกระแสเชื่อม ถูกนำมาตัดขวางและขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 120 180 240 320 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ และขัดมันด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.3 ไมโครเมตร จากนั้นถูกนำไปกดหาค่าความแข็งบริเวณกึ่งกลางของแนวแล่นประสาน โดยกดหาค่าความแข็งจำนวน 5 จุดในแต่ละกระแสเชื่อม แล้วจึงคำนวณหาค่าเฉลี่ย ในการวัดค่าความแข็งใช้เครื่องวัดค่าความแข็งในหน่วยวิกเกอร์ โดยใช้น้ำหนักกด 500 กรัม เป็นเวลา 15 วินาที

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 การแทรกตัวของลวดเติม

กราฟแสดงระยะการแทรกตัวของลวดเติมที่เกิดจากจากการแล่นประสานด้วยกระแสเชื่อมต่างๆในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าที่กระแสเชื่อม 70 แอมป์ มีการแทรกตัวของลวดเติมที่ 1.08 มิลลิเมตร และเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 95 แอมป์ มีการแทรกตัวของลวดเติมเพิ่มขึ้นเป็น 2.02 มิลลิเมตร

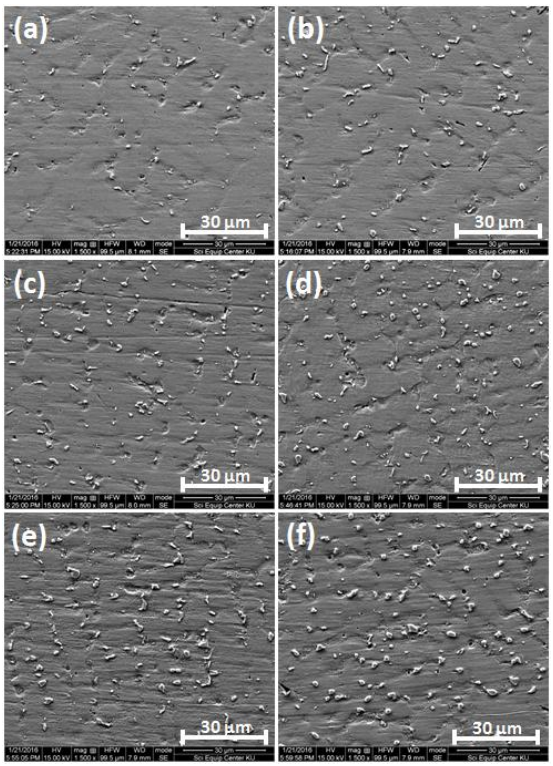


รูปที่ 2 กราฟแสดงระยะการแทรกตัวของลวดเติมที่แต่ละกระแสเชื่อม

จากรูปที่ 2 จะพบว่าแนวโน้มระยะการแทรกตัวของลวดเติมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้กระแสเชื่อมในการแล่นประสานสูงขึ้น เนื่องมาจากกระแสเชื่อมทำให้ความร้อนของการแล่นประสาน (Heat input) เกิดมากขึ้น [4, 13] เมื่อความร้อนของการแล่นประสานมากขึ้น จะทำให้ลวดเติมเกิดการหลอมละลายที่ดีขึ้น จึงทำให้แรงตึงผิวของลวดเติมลดลง และเกิดการไหลที่ดีขึ้น [10-11, 14] จึงทำให้ระยะการแทรกตัวของลวดเติมมีค่ามากขึ้น [15]

3.2 โครงสร้างจุลภาคของแนวแล่นประสาน

ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของแนวแล่นประสาน ที่เกิดขึ้นจากการแล่นประสานด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของแนวแล่นประสานที่กระแสเชื่อม 70 แอมป์ มีอนุภาคใหม่ที่มีขนาดเล็กเกิดขึ้นลักษณะคล้ายการตกตะกอน (Precipitation) และกระจายอยู่ทั่วในเนื้อพื้นของแนวแล่นประสาน แต่เมื่อกระแสเชื่อมสูงขึ้นเป็น 95 แอมป์ อนุภาคที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการกระจายอยู่ในเนื้อพื้นของแนวแล่นประสานที่เพิ่มขึ้น เห็นได้ว่าเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการตกตะกอนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงของกระแสเชื่อม 70 แอมป์ ถึง 80 แอมป์ (รูปที่ 3a-3c) มีการเพิ่มขึ้นของอนุภาคตกตะกอนอย่างเห็นได้ชัด แต่ในช่วงกระแสเชื่อม 85 แอมป์ ถึง 95 แอมป์ (รูปที่ 3d-3f) อัตราการเพิ่มขึ้นของอนุภาคตกตะกอนนี้มีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงโครงสร้างจุลภาคของแนวแล่นประสานที่แต่ละกระแสเชื่อมคือ (a) 70 แอมป์ (b) 75 แอมป์ (c) 80 แอมป์ (d) 85 แอมป์ (e) 90 แอมป์ และ(f) 95 แอมป์

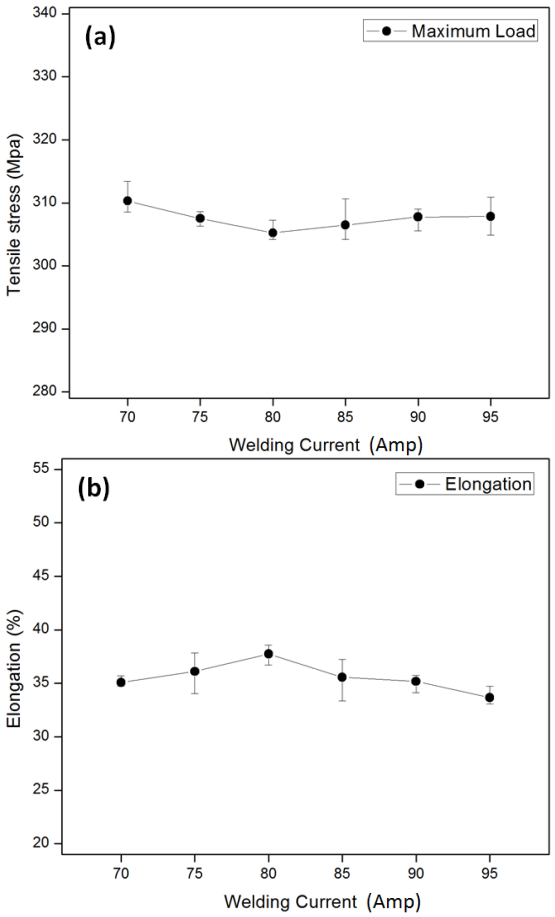
จากงานวิจัยของ Kai et al. [3] ซึ่งเป็นการทดลองที่ใช้วัสดุและลวดเติมชนิดเดียวกัน คือ เหล็กชุบสังกะสี และลวดเติมทองแดงซิลิคอน โดยกระบวนการแล่นประสานโดยใช้เลเซอร์ ได้อธิบายว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นเป็นการตกตะกอนของเฟสสารประกอบกึ่งโลหะในรูปของสารประกอบ $Fe_5Si_3(Cu)$ เนื่องจากเกิดการจับตัวกันของธาตุประกอบต่างๆที่มาจากลวดเติมทองแดงซิลิคอนและเหล็กชุบสังกะสี เฟสที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะส่งผลต่อ

สมบัติทางกลของแนวแล่นประสาน [3, 8] แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของสารประกอบ $Fe_5Si_3(Cu)$ มีแนวโน้มลดลง

3.3 ความแข็งแรงของแนวแล่นประสาน

ค่าความแข็งแรงทางดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของแนวแล่นประสาน ที่ได้จากการแล่นประสานที่กระแสเชื่อมต่างๆ แสดงในรูปที่ 4 พบว่าค่าความแข็งแรงทางดึงของชิ้นงานที่แล่นประสานในรูปที่ 4a มีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 306 Mpa ถึง 308 Mpa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานจนกระทั้งขาดในรูป 4b มีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุกกระแสเชื่อม คืออยู่ในช่วงระหว่าง 33 % ถึง 36 %

ค่าความแข็งแรงทางดึงและค่าเปอร์เซ็นต์ระยะการยืดตัวของชิ้นงานที่ผ่านการแล่นประสานจากกระแสเชื่อมต่างๆ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากแนวแล่นประสานที่ได้จากตัวแปรที่กำหนด ทำให้เกิดแนวแล่นประสานที่มีความแข็งแรงที่มากกว่าโลหะชิ้นงาน จึงทำให้การขาดเกิดขึ้นที่บริเวณของตัววัสดุที่มีความแข็งแรงต่ำกว่า อย่างในงานวิจัยของ Dharmendra et al. [5] และ Fujii et al. [16] ที่ใช้การเชื่อมแบบอื่นๆ โดยในงานวิจัยนี้บริเวณที่ขาด คือบริเวณที่เป็นเหล็กชุบสังกะสีในทุกกระแสเชื่อมที่แล่นประสาน ดังนั้นค่าความแข็งแรงทางดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ได้ จึงเป็นค่าใกล้เคียงของเหล็กชุบสังกะสีในทุกเงื่อนไข

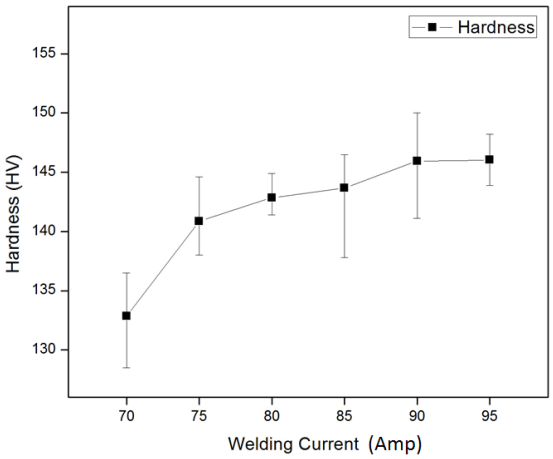


รูปที่ 4 (a) กราฟแสดงความแข็งแรงทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานในแต่ละกระแสเชื่อม และ (b) กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานในแต่ละกระแสเชื่อม

3.4 ค่าความแข็งของแนวแล่นประสาน

ค่าความแข็งของแนวแล่นประสาน ที่ได้จากการแล่นประสานโดยใช้กระแสเชื่อมต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งจากการวัดค่าความแข็งของแนวแล่นประสานจากกระแส 70 75 80 85 90 และ 95 แอมป์ พบว่าค่าความแข็งของแนวแล่นประสานมีค่าประมาณ 132.8 140.9 142.9 143.7 145.9 และ 146.0 HV ตามลำดับ ซึ่งจะเห็น

ว่าเมื่อใช้กระแสเชื่อมในการแล่นประสานที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งของแนวแล่นประสานเพิ่มขึ้นแต่ในอัตราที่ลดลง



รูปที่ 5 กราฟแสดงค่าความแข็งของแนวแล่นประสานที่แต่ละกระแสเชื่อม

เนื่องจากที่กระแสเชื่อมในการแล่นประสานสูงขึ้นจะทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟส $Fe_5Si_3(Cu)$ ที่เป็นเฟสของสารประกอบกึ่งโลหะเพิ่มขึ้น [3, 9] ดังแสดงจากรูปที่ 3 สารประกอบกึ่งโลหะที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นเฟสที่ช่วยเสริมแรงให้กับเนื้อพื้นของแนวแล่นประสาน [3, 17] จึงส่งผลให้ค่าความแข็งของแนวแล่นประสานมีค่าเพิ่มขึ้น [8]

4. สรุปผล

ในงานวิจัยนี้พบว่า กระแสเชื่อมที่ใช้ในการแล่นประสานส่งผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการ เมื่อกระแสเชื่อมในการแล่นประสานที่เพิ่มขึ้น ทำให้ลวดเติมทองแดงซิลิคอนในการทดลอง สามารถหลอมละลายได้ดีขึ้น จึงทำให้ลวดเติมสามารถแทรกตัวได้มากขึ้น นอกจากนี้จากผลของโครงสร้างจุลภาคของแนวแล่นประสานพบว่ามีการตกตะตอนของเฟสใหม่ที่ช่วยเสริมแรงให้กับเนื้อพื้นของแนวแล่นประสาน ซึ่งเป็นเฟสของสารประกอบกึ่งโลหะชนิดเหล็กซิลิคอนทองแดง ($Fe_5Si_3(Cu)$) โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของขนาดและจำนวนของ $Fe_5Si_3(Cu)$ ที่ลดลงเมื่อกระแสเชื่อมในการแล่นประสานที่สูงขึ้น ด้วยเหตุผลนี้ค่าความแข็งของแนวแล่นประสานจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้กระแสเชื่อมสูงขึ้น

5. กิติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่ง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KURDI) คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำหรับการสนับสนุนการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] K. Songsorn, “Experimental of Effect of Mig-Brazing Galvanized Steel Sheet Parameters Quality on Joint”, Master Thesis, Faculty of Engineering, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, Thailand. 2003.

[2] V. Pakjan, “Analysis of Effect of MIG Brazing on Galvanized Steel Sheet about Background Current and Peak Time at Max Current for Quality on Lap Joint”, Master Thesis, Faculty of

Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand. 2006.

[3] M. Kai, Y. Zhang, Z. Peilei, L. Yunlong, Y. Hua, L. Chonggui and L. Xiaopeng, "Influence of wire feeding speed on laser brazing zinc-coated steel with Cu-based filler metal", Int J Adv Manuf Technol 76, 2008, pp. 1333-1342.

[4] F. Varol, E. Ferik, U. Ozsarac and S. Aslanlar, "Influence of current intensity and heat input in Metal Inert Gas-brazed joints of TRIP 800 thin zinc coated steel plates", Materials & Design 52, 2013, pp. 1099-1105.

[5] C. Dharmendra, K.P. Rao, J. Wilden and S. Reich, "Study on laser welding-brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with a zinc based filler", Materials Science and Engineering A 528, 2011, pp. 1497-1503.

[6] F.G. Lu, B.F. Lu, X.H. Tang and S. Yao, "Study of influencing factors and joint performance of laser brazing on zinc-coated steel plate", Int J Adv Manuf Technol 37, 2008, pp. 961–965.

[7] U. Sriprasert, "The Study of Mig Brazing Parameter Effect on joint from using ER-CuSi-A and ER CuAl-Al", The Journal of Applied Science 6(1-2), 2007, pp. 74-82.

[8] R.F. Li, Z.S. Yu and J.P. He, "Analysis of joints interfaces and performance of pulsed arc brazing on zinc-coated steel plate", Trans China Weld Inst 29, 2008, pp. 93–96.

[9] Z.S. Yu, L.R. Feng and Q. Kai, "Growth behavior of interfacial compounds in galvanized steel joints with CuSi3 filler under arc brazing", Transactions of Nonferrous Metals Society of China 16, 2006, pp. 1391-1396.

[10] T. Yingsamphancharoen and B. Poopat, "Effect of Electrode Extension on Electrode Melting Rate in Gas Metal Arc Welding", The Journal of Applied Science 3(2), 2004, pp. 34-43.

[11] T. Yingsamphancharoen, C. Phantuchart, C. Khantujan, V. "The Study Influence of Gas Shield Effecting to the Deep Penetration in Gas Metal Arc Welding", The Journal of Industrial Technology 2(1), 2006, pp.26-32.

[12] ASTM D1002-10 Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading

[13] S. Krishnan, D.V. Kulkarni and A. De, "Pulsed current gas metal arc welding of P91 steels using metal cored wires", Journal of Materials Processing Techology 229, 2016, pp. 826-833.

[14] W. Pattanapong, T. Yingsamphancharoen and N. Srisuwan, "Investigation of the Suitable Weld Current Range for ASTM A36 Carbon Steel through Semi-Automatic Flux-Cored Arc Welding", The Journal of Industrial Technology 10(2), 2014, pp.60-71.

[15] Y. Yuan and T.R. Lee, "Contact Angle and Wetting Properties", Surface Science Techniques 51, 2013, pp. 3-36.

[16] H.T. Fujii, Y. Goto, Y.S. Sato and H. Kokawa, "Microstructure and lap shear strength of the weld interface in ultrasonic welding of Al alloy to stainless steel", Scipta Materialia 116, 2016, pp. 135-138.

[17] W.D. Callister, Jr., "Materials Science and Engineering: An Introduction (6^{th} Eds.)", John Wiley & Sons, New York. 2003.