



การเชื่อมต้านทานแบบจุดอลูมิเนียมและเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี Resistance Spot Welding Aluminum Alloy to Galvanized Steel

ศักดิ์ชัย จันทศรี¹ ไพบุลย์ แยมเื่อน² สมชาย วนไทยสงค์³ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์^{1,2,4}
^{1,2,4} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
³ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี
29 เพชรเกษม 110 แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10160
E-mail: sakchai747@hotmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอการทบทวนการประยุกต์ใช้การเชื่อมต้านทานแบบจุดในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กกล้า ผลการศึกษาพบว่า การเชื่อมต้านทานแบบจุดสามารถใช้ในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กกล้าได้ แต่ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมต้องทำการพิจารณาต่อไป การก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อเป็นสิ่งที่ต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ เนื่องจากความหนาและชนิดของสารประกอบกึ่งโลหะส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของรอยต่อการวิจัยและพัฒนาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กกล้า ควรมีการดำเนินการต่อไปเพื่อเป็นการเตรียมข้อมูลพื้นฐานสำหรับงานอุตสาหกรรมต่อไป
คำหลัก การเชื่อมเสียดทานแบบจุด, อลูมิเนียม, เหล็กกล้า,

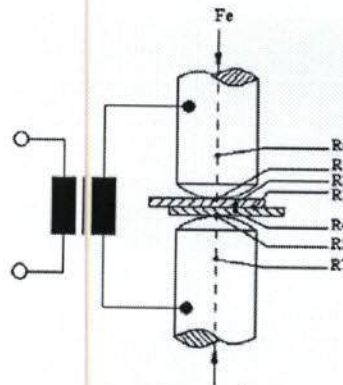
1. บทนำ

การเชื่อมต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding: RSW) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายที่อาศัยความร้อนที่เกิดจากการต้านทานการไหลของกระแสผ่านพื้นที่รอยต่อในการหลอมวัสดุและกดให้ติดกันด้วยแรงดันจากอิเล็กโทรดทั้งสองข้างให้ติดกัน กระบวนการเชื่อมนี้เป็นวิธีการสำคัญที่ใช้กันมากในงานอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ ดังเห็นได้จากรถยนต์หนึ่งคันที่มีปริมาณการต่อยึดด้วยการเชื่อมต้านทานแบบจุดของชิ้นส่วนระหว่างวัสดุเดียวกัน วัสดุต่างชนิด หรือวัสดุที่มีความหนาแตกต่างกัน ในปริมาณมากกว่าหนึ่งพันจุด [1] หนึ่งในข้อดีของการเชื่อมต้านทานแบบจุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมทิก คือ รอยเชื่อมของการเชื่อมต้านทานแบบจุดนั้นเกิดขึ้นด้านในของรอยต่อ ขณะที่รอยเชื่อมของการเชื่อมทิกเกิดขึ้นด้านนอก ลักษณะเช่นนี้ทำให้รอยเชื่อมของการเชื่อมทิกนั้นมีความง่ายต่อการตกแต่งมากกว่า [2]

ขณะเดียวกันในมุมมองของอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ในปัจจุบันที่มุ่งเน้นในการผลิตรถยนต์ที่มีการใช้น้ำมันอย่างประหยัดเพื่อเป็นการอนุรักษ์พลังงาน และรักษาสังแวดล้อม อุตสาหกรรมยานยนต์ได้พยายามคิดค้นหาวิธีการในการลดการใช้น้ำมันของรถยนต์ด้วยวิธีการต่าง ๆ หนึ่งในวิธีการที่มีการใช้งานในปัจจุบัน คือ การทำให้น้ำมันโดยรวมน้อยลงของรถยนต์ลดลง ซึ่งทำได้โดยการนำเอา

วัสดุที่มีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง เช่น เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High strength low alloy: HSLA) วัสดุประกอบ (Composite materials) หรืออลูมิเนียมผสมเข้ามาแทนที่ชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็กกล้าที่มีน้ำหนักสูงกว่า [3] วัสดุน้ำหนักเบาที่นิยมนำมาใช้งานเพิ่มขึ้นในการทดแทนเหล็กกล้าในปัจจุบัน คือ อลูมิเนียม เนื่องจากอลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงและน้ำหนักสูงกว่าเหล็กประมาณ 2 เท่า [4] อย่างไรก็ตามในการเชื่อมต้านทานแบบจุดรอยต่อระหว่างเหล็กและอลูมิเนียมนั้นมีความยากลำบากในการเชื่อมเพื่อให้ได้รอยต่อที่มีประสิทธิภาพสูง และวัสดุบางตัวที่มีการใช้งานมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ในประเทศไทย คือ รอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD และอลูมิเนียม AA1100 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้งานมากในการผลิตตัวถังของรถยนต์นั้นไม่มีการรายงานไว้ ดังนั้นหากมีการทำการทดลองเพื่อเตรียมข้อมูลไว้ อาจทำให้เกิดประโยชน์สูงในอนาคตเพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไทยต่อไป

2. พื้นฐานการเชื่อมต้านทานแบบจุด



รูปที่ 1 การเกิดความต้านทานในการเชื่อมต้านทานแบบจุด [5]

การเชื่อมต้านทานแบบจุด คือ กรรมวิธีการประสานวัสดุที่ผิวหน้าสัมผัสของรอยต่อด้วยความร้อนที่เกิดจากความต้านทานการไหลของกระแสผ่านรอยต่อที่ถูกกดแน่นด้วยแรงกดจากอิเล็กโทรด



(Fe) ดังแสดงในรูปที่ 1 ผิวสัมผัสในพื้นที่ที่กระแสเข้มข้นมีความร้อนเพิ่มขึ้นโดยความต่างศักย์ที่มีค่าต่ำและกระแสที่ค่าสูงในช่วงพัลส์ช่วงสั้นๆ เพื่อทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะเชื่อม เมื่อกระแสเกิดการไหล แรงกดจากอิเล็กโทรดจะกดคานึงจนบริเวณที่หลอมละลายเย็นตัวและแข็งตัว และปล่อยแรงกดออกเมื่อแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ซึ่งใช้เวลาค่อนข้างสั้น

ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมขึ้นงานดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วยความต้านทานทั้งหมด 7 จุด ดังนี้

- ค่าความต้านทาน R1 คือ ความต้านทานของผิวชิ้นทดสอบด้านบน (Upper specimen resistance)
- ค่าความต้านทาน R2 คือ ความต้านทานระหว่างผิวของชิ้นทดสอบด้านบน (Upper specimen resistance) และผิวของอิเล็กโทรดด้านบน (Upper electrode contact resistance)
- ค่าความต้านทาน R3 คือ ความต้านทานระหว่างผิวของชิ้นทดสอบด้านบน (Upper specimen resistance) และผิวของชิ้นทดสอบด้านล่าง (Lower specimen resistance)
- ค่าความต้านทาน R4 คือ ความต้านทานของผิวชิ้นทดสอบด้านล่าง (Lower specimen resistance)
- ค่าความต้านทาน R5 คือ ความต้านทานระหว่างผิวของชิ้นทดสอบด้านล่าง (Lower specimen resistance) และผิวของอิเล็กโทรดด้านล่าง (Lower electrode contact resistance)
- ค่าความต้านทาน R6 คือ ความต้านทานของอิเล็กโทรดด้านบน (Upper electrode resistance)
- ค่าความต้านทาน R7 คือ ความต้านทานของอิเล็กโทรดด้านล่าง (Lower electrode resistance)

Aslanlar [5] ได้สรุปค่าความต้านทานโดยรวมของการเชื่อมต้านทานแบบจุดว่าสามารถหาค่าได้ ตามสมการที่ 1 คือ

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \quad (1)$$

เมื่อค่าความต้านทานประกอบด้วยสองส่วน คือ ความต้านทานของวัสดุ (R_1, R_2, R_3, R_4) และความต้านทานที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโทรด (R_5, R_6) ความต้านทานของวัสดุขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน (R_1, R_2) และอิเล็กโทรด (R_3, R_4) ค่าต่างๆ เหล่านี้ไม่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงขณะทำการเชื่อม ขณะเดียวกันค่าความต้านทานที่จุดสัมผัสนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับสภาวะของปลายอิเล็กโทรด ค่าความต้านทานที่ทำให้เกิดแนวเชื่อมเกิดขึ้นจากค่าความต้านทาน R_3 ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เกิดความร้อนสูงสุดในรอยต่อแยก ค่าความร้อนที่มีค่าสูงนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะพื้นผิวของของโลหะที่ใช้เชื่อม แรงกดกระแสเชื่อม และเวลาเชื่อม

นอกจากนั้นหากพิจารณาความร้อนที่เกิดขึ้นแล้ว ค่าความต้านทานโดยรวมขึ้นอยู่กับความดันที่ผิวสัมผัส ค่า R_1, R_2 และ R_3 ที่อินเทอร์เฟซระหว่างชิ้นงาน การให้ความร้อนพื้นที่สัมผัส R_1 และ R_2 ที่ถูกต้องต้องมีการชดเชยค่าอุณหภูมิและรักษาอุณหภูมิของอิเล็กโทรดให้มีค่าต่ำ ตัวแปรสำคัญที่ทำให้ได้ค่าความร้อนที่

ถูกต้อง คือ อิเล็กโทรดต้องมีสมบัติการนำความร้อนที่ดี มีผิวที่ละเอียดและสะอาดปราศจากสิ่งปนเปื้อน เช่น ครบน้ำมัน หรือจาระบี [5]

การเชื่อมต้านทานแบบจุดนี้ นิยมในการนำไปทำการเชื่อมประกอบโลหะแผ่นบาง เช่น โครงสร้างรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เฟอร์นิเจอร์ สิ่งก่อสร้าง ชิ้นส่วนเครื่องบิน เป็นต้น ข้อดีของการเชื่อมต้านทานแบบจุดที่เห็นได้เด่นชัด คือ ความเร็วในการเชื่อมมีค่าสูง และมีความเหมาะสมสำหรับการผลิตแบบอัตโนมัติ สามารถนำไปรวมในการผลิตแบบอัตโนมัติในสายการผลิตร่วมกับเครื่องจักรต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ทำให้เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการหาช่างฝีมือในการปฏิบัติการได้อย่างดีเยี่ยม [6]

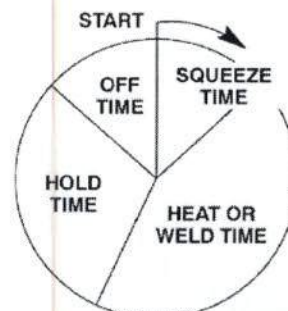
3. ตัวแปรการเชื่อม

3.1 การเกิดความร้อน (Heat generation)

การประยุกต์ใช้กฎของโอห์มเมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำ ความต้านทานไฟฟ้าที่ยับยั้งการไหลผ่านของกระแสทำให้เกิดความร้อน (H) ที่สัมพันธ์กับกระแสเชื่อม (I) และความต้านทาน (R) โดยเป็นไปตามสูตรพื้นฐาน [2] ดังนี้

$$H = I^2 R \quad (2)$$

3.2 เวลา (Time) [2]



รูปที่ 2 รอบเวลาการเชื่อมต้านทานแบบจุด [2]

การเชื่อมต้านทานแบบจุดเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้น โดยทั่วไปกระแสที่ใช้ในการเชื่อมต้านทานแบบจุดมีค่าที่ 60 ไซเคิล (Cycle) โดยที่ 60 ไซเคิล มีค่าเท่ากับ 1 วินาที เวลาในการเชื่อมต้านทานแบบจุดแสดงได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยเวลาหลัก 4 ส่วน และนิพนธ์ คุณาวงค์ [7] ได้ให้คำนิยามต่างๆ ที่น่าสนใจดังนี้

- เวลากด (Squeeze time) คือ เวลาที่เริ่มต้นเข้ามาของสัญญาณเชื่อมและกระแสเชื่อมในครั้งแรกเป็นเวลาที่ยอดอิเล็กโทรดสัมผัสกับชิ้นงานและมีแรงกดเพียงพอก่อนที่จะกระแสเชื่อมถูกปล่อยออกมา
- เวลาเชื่อม (Weld time) คือ เวลาที่กระแสเชื่อมถูกปล่อยเข้ามาในชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม ในช่วงลักษณะการเชื่อมหนึ่งครั้ง
- เวลาพักค้าง (Hold time) คือ ช่วงเวลาที่แรงกดจากหัวอิเล็กโทรดที่ยังกระทำต่อชิ้นงานหลังจากการเชื่อมในช่วงเวลาท้ายสุดสิ้นสุด



ลง ช่วงเวลานี้เป็นช่วงเวลาที่ปล่อยให้รอยเชื่อมมีเวลาแข็งตัว ที่มากเพียงพอที่จะสร้างความแข็งแรงขึ้นในรอยเชื่อมจนสามารถ ยอมรับได้

- เวลาเย็นตัว (Off time) คือ ช่วงเวลาระหว่างเวลาที่หัวอิเล็กโทรด เสร็จสิ้นการทำงาน ณ ตำแหน่งที่ทำการเชื่อมและการเคลื่อนที่ ไปทำการเชื่อมที่ตำแหน่งที่ต้องการต่อไป เป็นลักษณะการเชื่อม ขั้วรอบการเชื่อมเดิม (กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมยังคงเดิม)

ด้วยเหตุนี้ เมื่อทำการพิจารณาเวลาการเชื่อมเข้ามา เกี่ยวข้องแล้ว สมการการเกิดความร้อนสมการที่ 2 จะเกิดการ เปลี่ยนแปลงได้สมการการเกิดความร้อน (H) จากการเชื่อม ด้านทานแบบจุด [2] ที่สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า (I) ความต้านทาน (R) เวลาเชื่อม (t) และการสูญเสียความร้อน (K) ดังนี้

$$H = I^2 RTK \quad (3)$$

เวลาการเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการเชื่อม ด้านทานแบบจุด ถ้าเวลาในการเชื่อมยาวนานเกินไปแล้วอาจทำให้ โลหะเชื่อมเกิดการหลอมละลายได้ และอาจส่งผลทำให้เกิดโพรง อากาศภายในได้ นอกจากนี้ อาจทำให้เกิดการดึงเอาโลหะ หลอมเหลวออกจากพื้นที่การเชื่อมซึ่งทำให้เกิดการลดพื้นที่หน้าตัด ลงได้ เวลาการเชื่อมที่สั้นเกินไปนั้นทำให้การถ่ายเทความร้อน เป็นไปได้ลำบากในโลหะเชื่อม ไม่เกิดการบิดเบี้ยว พื้นที่ผลกระทบ ความร้อนรอบๆ รอยนักเกิดมีขนาดเล็ก

อย่างไรก็ตามสมการความร้อนที่แสดงในสมการที่ 3 ไม่ นิยมนำมาใช้มากนัก เนื่องจากค่าสูญเสียความร้อนนั้นมีค่าที่ สามารถวัดได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงมีการประยุกต์ใช้สมการความร้อน (Q) ที่ก่อตัวในแนวเชื่อม [5,7-8] ที่สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า (I) ความต้านทาน (R) และเวลาเชื่อม (t) ดังต่อไปนี้

$$Q = I^2 Rt \quad (4)$$

3.3 แรงกด (Pressure)

จุดประสงค์ของการใช้แรงกดดันต่อรอยต่อการเชื่อม ด้านทานแบบจุด คือ การกดยึดชิ้นงานสองชิ้นเข้าด้วยกันใน ขั้นตอนเริ่มต้นการเชื่อมเพื่อทำให้เกิดความต้านทานไฟฟ้าและการ นำไฟฟ้าที่จุดที่ต้องการเชื่อม ไม่ได้มีหน้าที่ในการจับยึดชิ้นงานให้ แน่นเข้าหากัน ด้วยเหตุนี้ในการเชื่อมด้านทานแบบจุด ชิ้นงานต้อง ใช้เครื่องมืออื่นๆ เช่น อุปกรณ์จับยึด ในการจับยึดชิ้นงานให้แน่น และอยู่ในตำแหน่งการเชื่อมก่อนการกดของอิเล็กโทรดเสมอ

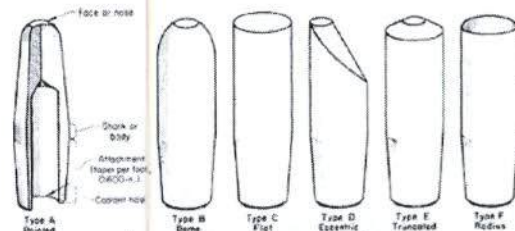
ค่าแรงกดที่มีค่ามากจะทำให้ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นใน ชิ้นงานเชื่อมนั้นมีค่าลดลงที่จุดสัมผัสระหว่างปลายอิเล็กโทรดและ ผิวชิ้นงาน ค่าแรงกดที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการนำความร้อนจาก โลหะเชื่อม ค่ากระแสที่มีค่าสูงนั้นจำเป็นต้องใช้ค่าแรงกดที่มีค่ามาก ขณะที่แรงกดน้อยต้องการค่ากระแสที่มีค่าน้อย ดังนั้นในการใช้งาน เครื่องเชื่อมจึงควรมีการใช้งานอย่างระมัดระวัง

3.4 หัวอิเล็กโทรด (Electrode tip)

ทองแดง คือ โลหะที่นิยมนำมาทำเป็นอิเล็กโทรดการเชื่อม ด้านทานแบบจุด จุดประสงค์หลักในการใช้อิเล็กโทรด คือ เพื่อเป็น ตัวนำกระแสการเชื่อมสู่ชิ้นงาน บริเวณจุดที่มีแรงกดกระทำ เพื่อนำ ความร้อนออกจากผิวหน้าชิ้นงาน และเพื่อรักษาคุณลักษณะของ ความร้อนและกระแสไฟฟ้าการเชื่อมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมขณะ ทำการเชื่อม

ปลายอิเล็กโทรดทำจากทองแดงผสมหรือวัสดุอื่นๆ โดย สมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมด้านทาน (The Resistance Welders Manufacturing Association: RWMA) ได้แบ่งกลุ่มปลายอิเล็ก โทรดออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- กลุ่ม A ทองแดงผสม (Copper based alloy) และมีการแบ่งกลุ่มย่อยโดยใช้เลขโรมัน I-V โดยกลุ่ม I นั้นเป็นกลุ่มที่มีส่วนผสมเคมี ไกล่เคียงกับทองแดงบริสุทธิ์มากที่สุด เมื่อตัวเลขแบ่งกลุ่มเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงและอุณหภูมิการอบอ่อนจะเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าการนำ ความร้อนและการนำไฟฟ้าลดลง
- กลุ่ม B โลหะทนความร้อนสูง (Refractory metal) เป็นโลหะผสม ขึ้นรูป ยกตัวอย่างเช่น ของผสมระหว่างทองแดงและไททาเนียม ที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันการเกิดการสึกกร่อนและความ ด้านทานการกดอัดที่อุณหภูมิสูง ในกลุ่มนี้มีการแบ่งกลุ่มย่อย ออกเป็นระดับ 10 11 12 13 และ 14 ยกตัวอย่างเช่น กลุ่ม 10 หมายถึง ค่าสมบัติการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับร้อยละ 40 ของ ทองแดง ค่าการนำไฟฟ้านี้มีค่าลดลงเมื่อจำนวนตัวเลขเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3 รูปร่างมาตรฐานของอิเล็กโทรด [6]

รูปที่ 3 แสดงรูปแบบของอิเล็กโทรดมาตรฐานของสมาคม ผู้ผลิตเครื่องเชื่อมด้านทาน 6 รูปแบบแสดงด้วยสัญลักษณ์ตัวอักษร ตั้งแต่ A ถึง F อิเล็กโทรด A แบบจุด (Type A Pointed) ใช้สำหรับ งานที่ต้องการค่าความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางนักเกิดสูง อิเล็กโทรด D แบบรูปร่างผิดปกติ (Eccentric type) ใช้กับพื้นที่แคบๆ หรือมุมอับ เป็นต้น

พิจารณารูปแบบการเชื่อมด้านทานแบบจุด พบว่าขนาดของ นักเกิดนั้นสามารถควบคุมได้ด้วยขนาดของปลายอิเล็กโทรด [2] โดยปกติขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของนักเกิดควรมีขนาดเล็กกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรดเล็กน้อย ถ้าปลายอิเล็กโทรดมี ค่าน้อยจะส่งผลทำให้นักเกิดมีขนาดเล็กและไม่แข็งแรง แต่ถ้าเส้น ผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดนั้นมีขนาดใหญ่เกินไป จะ ส่งผลทำให้นักเกิดมีขนาดใหญ่ และทำให้แนวเชื่อมเกิดรูพุนได้



การหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโทรดของการเชื่อมอิเล็กโทรด [2] สามารถหาค่าได้โดยการใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรด} = 0.100'' + 2t \quad (5)$$

เมื่อ t คือ ความหนาของวัสดุมีหน่วยเป็นนิ้ว สมการนี้สามารถใช้กับการเชื่อมโลหะที่มีความหนาต่างกันได้อย่างไรก็ตาม สมการที่ 5 นี้แตกต่างจากสมการที่เสนอโดยสมาคมโลหะอเมริกา [6] ที่แสดงสมการสำหรับคำนวณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดสำหรับแผ่นโลหะที่มีความหนาไม่เกิน 3 มม. (1/8 นิ้ว) เมื่อใช้อิเล็กโทรดแบบ F ที่แสดงในรูปที่ 3 สามารถหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดที่มีค่าดังสมการที่ 6 ดังนี้

$$D_2 = \sqrt{t} \quad (6)$$

เมื่อ D_2 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดในหน่วย มม. และ t คือ ความหนาของแผ่นวัสดุ โดยเมื่อใช้อิเล็กโทรดแบบ F แล้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดมีค่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางนักเกต หรืออาจมีค่าเท่ากับ

$$D = D_2 = 5\sqrt{t} \quad (7)$$

เมื่อทำการเชื่อมวัสดุที่มีความหนาต่างกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดและเส้นผ่านศูนย์กลางนักเกตต้องมีค่าเหมาะสมอ้างอิงตามแผ่นบางกว่าเป็นหลัก หรือหากทำการเชื่อมโลหะสามแผ่นเข้าด้วยกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดและเส้นผ่านศูนย์กลางนักเกตต้องมีค่าเหมาะสมอ้างอิงตามแผ่นที่สอง

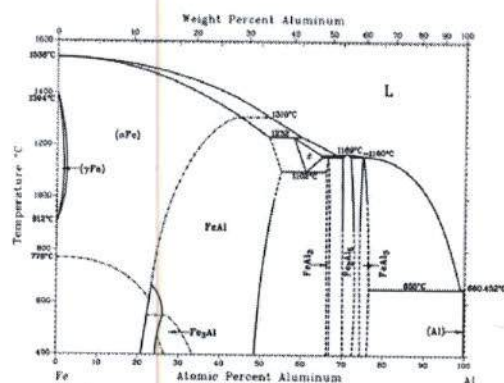
หากใช้อิเล็กโทรดแบบ A หรือ B สมการที่ 5 อาจไม่สามารถใช้ได้ ขนาดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดจะขึ้นอยู่กับความกว้างของแผ่นประกอบซึ่งอาจสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 6 นอก จากนั้นเมื่อพิจารณาการใช้งานจากสภาพการใช้งานจริงแล้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดจะมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงต้องมีการปรับปรุงให้มีขนาดที่ยอมรับได้เสมอ ซึ่งขนาดที่สามารถยอมรับได้ต้องมีค่าไม่เกิน 30% ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดเริ่มต้น

4. โลหะวิทยาการรวมตัวของอลูมิเนียมและเหล็ก

รูปที่ 4 แสดงแผนภาพสมดุลเฟสโลหะผสมเหล็กและอลูมิเนียมที่ใช้ในการพยากรณ์เฟสที่มักเกิดขึ้นในการรวมตัวของอลูมิเนียมและเหล็ก พบว่าเมื่อมีการรวมตัวของอลูมิเนียมและเหล็กด้วยวิธีการใดๆ ก็ตาม สารประกอบกึ่งโลหะรูปแบบต่างๆ จะเกิดขึ้น และสามารถแบ่งกลุ่มของสารประกอบกึ่งโลหะออกได้เป็น 5 ชนิด คือ เฟส Fe_3Al , FeAl , FeAl_2 , Fe_2Al_3 และ FeAl_3

เพื่อความเข้าใจที่ง่ายขึ้น Kobayashi and Yakou [9] ได้แบ่งกลุ่มของสารประกอบกึ่งโลหะออกเป็น 2 กลุ่มตามปริมาณของ

ธาตุผสมในสารประกอบกึ่งโลหะ คือ สารประกอบกึ่งโลหะที่มีปริมาณของอลูมิเนียมผสมสูง สารประกอบกึ่งโลหะกลุ่มนี้มีสมบัติคือ แข็งและเปราะ ซึ่งหากนำไปทำการรับแรงแล้วจะทำให้เกิดการพังทลายได้ง่ายเนื่องจากมีความยืดหยุ่นต่ำ และสารประกอบกึ่งโลหะที่มีปริมาณของเหล็กผสมสูง สารประกอบกึ่งโลหะกลุ่มนี้มีสมบัติคือ มีความต้านทานการสึกกร่อน (Wear Resistance) ดี มีความต้านทานการเกิดออกไซด์ (Oxide Resistance) สูง และมีความต้านทานการแตกหัก (Fracture Strength) ดี



รูปที่ 4 แผนภาพสมดุลเฟสอลูมิเนียมและเหล็ก [8]

ด้วยเหตุนี้ในการเชื่อมด้านแบบจุ่มรอยต่อวัสดุต่างชนิด โดยเฉพาะรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก ควรให้ความสำคัญระดับระวางเป็นพิเศษ เพื่อให้ได้สมบัติทางกลตามต้องการ ในเบื้องต้นหากพิจารณาสมบัติของสารประกอบกึ่งโลหะทั้งสองแบบนี้ พบว่าสารประกอบที่มีปริมาณของเหล็กสูง คาดว่าจะทำให้รอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กนั้นมีความแข็งแรงเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่า

อย่างไรก็ตามปัญหาที่มักเกิดขึ้นในการเชื่อมยึดรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กที่พบในอดีต คือ การเกิดการแพร่ของอะตอมของธาตุทั้งสองเข้าหากัน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ของเหล็กสู่อลูมิเนียมมีค่า $53 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ที่ 793-922K และมีค่ามากกว่าการแพร่ของอลูมิเนียมสู่เหล็กที่มีค่า $1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ที่ 1003-1673K [9] ค่าต่างๆ เหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการแพร่ของอลูมิเนียมเข้าสู่เหล็กได้ง่ายกว่า

5. รอยต่อวัสดุต่างชนิดที่ผ่านการเชื่อมด้านแบบจุ่ม

- การเชื่อมอลูมิเนียมผสมเกรด A5052 เข้ากับแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCC และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซรอยต่อภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด ความแข็งแรงของรอยต่อทำการศึกษาด้วยการทดสอบแรงดึงแบบกภาพท และทำการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดพบว่า ความแข็งแรงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับชั้นสารประกอบ



โลหะที่ก่อตัวขึ้นบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อ ขณะที่ชั้นสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความไม่ต่อเนื่อง ส่วนมากพบที่บริเวณขอบของรอยต่อ เมื่อเปรียบเทียบกับสารประกอบกึ่งโลหะแบบต่อ เนื่องจากสารประกอบกึ่งโลหะที่ไม่ต่อเนื่องหากมีอัตราการเกิดสูงจะทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้น [3]

- รอยต่อระหว่างอลูมิเนียมผสม AA5182-O และเหล็กกล้า SAE 1008 โดยมีแผ่นสอดระหว่างแผ่นทั้งสอง คือ แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี SAE 1006 และแผ่นอลูมิเนียมผสม AA1050 พบพื้นที่การหลอมละลายแบ่งออกเป็นสองส่วน นักเกตุการณ์ของแผ่นเหล็กมีรูปร่างปกติเหมือนดังการเชื่อมตัวไป คือ มีรูปร่างวงรีคล้ายไข่ครึ่งใบที่ประกอบด้วยโครงสร้างเดนไดรท์ภายในนักเกตุ และด้านอลูมิเนียมมีรูปร่างวงรีครึ่งใบประกอบด้วยแถบบางตามอินเทอร์เฟซของรอยต่อ ความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าที่สามารถเทียบเคียงได้กับระดับความแข็งแรงของรอยที่ยึดด้วยรีเวท [10]

- รอยต่อระหว่างอลูมิเนียม A5052 และเหล็กกล้ารีดเย็น SPCC ที่มีความหนา 1.0 มม. โดยทำการเชื่อมด้านทานแบบจุดและเปลี่ยนแปลงกระแสการเชื่อมจาก 5-12 kVA ที่เวลาการเชื่อม 0.2 วินาที และแรงกด 2kN ชิ้นงานที่ได้ถูกนำมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทำการทดสอบความแข็งแรงแบบกนกบาท พบว่าความหนาของชั้นการเกิดปฏิกิริยานั้นมีความบางและมีขนาดที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่กึ่งกลางของแนวเชื่อม นอกจากนั้นเกิดการขยายตัวของแกนกราวด์เกิดที่รอบๆ แนวเชื่อมและเคลื่อนที่เข้าสู่กึ่งกลางของชั้นปฏิกิริยา ชั้นการเกิดปฏิกิริยาส่งผลต่อการลดค่าความแข็งแรงรอยต่อในกรณีที่มีความหนามากกว่า 1.5 มม. [11]

- รอยต่อระหว่างอลูมิเนียม A5052 และเหล็กกล้ารีดเย็น SPCC รอยต่อระหว่างอลูมิเนียม A5052 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 และรอยต่อระหว่างอลูมิเนียม A5052 ที่ทำการเชื่อมด้านทานแบบจุดที่มีแผ่นครอบด้านบนรอยเชื่อม พบว่า เมื่อใช้แผ่นครอบด้านบนการเชื่อมทำให้ได้นักเกตุที่มีขนาดใหญ่ถึงแม้ว่าใช้กระแสเชื่อมต่ำ โครงสร้างของรอยต่อระหว่างอลูมิเนียม A5052/เหล็กกล้ารีดเย็น SPCC และรอยต่อระหว่างอลูมิเนียม A5052/เหล็กกล้าไร้สนิม 304 แสดงการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะ Fe_2Al_5 และ $FeAl_3$ ค่าความหนาของสารประกอบกึ่งโลหะที่ก่อตัวขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเพิ่มขึ้น สารประกอบกึ่งโลหะไม่มีผลต่อรอยต่อระหว่างอลูมิเนียม A5052/เหล็กกล้าไร้สนิม 304 [12]

6. การพัฒนากระบวนการเชื่อมด้านทานแบบจุด รอยต่ออลูมิเนียมและเหล็ก

การเชื่อมด้านทานแบบจุดเป็นกระบวนการเชื่อมที่มีข้อดีและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ นอกจากนั้นจากผลการทดลองในอดีต พบว่าการเชื่อมด้านทานแบบจุดนี้ สามารถประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กได้ ในเบื้องต้นคาดว่าหากมีการพิจารณาเลือกใช้ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสม คาดว่าจะทำให้ได้รอยเชื่อมที่มีสมบัติเป็นไปตามต้องการได้ และควรมีการพิจารณาองค์ประกอบต่างๆ เหล่านี้้อย่างระมัดระวัง

- การเลือกตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสม เพื่อทำการการประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก ซึ่งตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องนั้นแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3 โดยจุดประสงค์หลักที่ต้องการคือ ตัวแปรการเชื่อมใดที่ทำให้รอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กแสดงค่าความแข็งแรงสูงสุด

- โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ ในการเชื่อมวัสดุชนิดเดียวกันนั้น รูปร่างของนักเกตุของรอยเชื่อม คือ สิ่งสำคัญที่แสดงความสามารถหลอมละลายเข้ากันของวัสดุ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของรอยต่อ อย่างไรก็ตามในการเชื่อมของรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กนั้น ในเบื้องต้นรูปร่างนักเกตุอาจไม่ใช่สิ่งที่บ่งชี้ถึงความแข็งแรงของรอยต่อ เนื่องจากรูปร่างของนักเกตุที่ดีหมายถึงความสามารถในการรวมตัวของวัสดุรอบๆ แนวเชื่อมที่ดีและอาจบ่งบอกถึงความสามารถในการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะที่เพิ่มขึ้น ในกรณีของรอยต่อระหว่างเหล็กและอลูมิเนียม โครงสร้างอินเทอร์เฟซ (Interface structure) เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงเป็นพิเศษ เนื่องจากการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะมักก่อตัวขึ้นที่บริเวณนี้ และเป็นบริเวณที่รับแรงโดยตรง เมื่อรอยต่อการเชื่อมด้านทานแบบจุดถูกนำไปใช้งาน การทดลองทำการเชื่อมเพื่อให้ได้ชั้นของสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความบางที่สุด หรือเป็นสารประกอบที่มีปริมาณของเหล็กผสมอยู่สูงเป็นความคาดหวังทางจินตภาพ ณ ปัจจุบันเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีความแข็งแรงต่อไป

- คุณสมบัติของรอยต่อแปรผันตรงกับกระแส เวลาเชื่อม และแรงกด ดังแสดงในสมการที่ 4 การทำให้เกิดรอยต่อที่อุณหภูมิต่ำสุดเท่าที่เป็นไปได้เป็นวิธีการในการหลีกเลี่ยงชั้นสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความหนาและเปราะ [9] ดังนั้นการควบคุมความร้อนเพื่อหลีกเลี่ยงการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะต้องพิจารณาอย่างระมัดระวัง

- การทดสอบสมบัติทางกลอื่นๆ ของรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กกล้าควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความมั่นใจในการนำรอยต่อไปใช้งาน ผลการทดลองที่ผ่านมาเน้นการทดสอบสมบัติทางกลได้ทำการทดสอบหาค่าแรงเฉือนด้วยวิธีต่างๆ เช่น วิธีการดึงเฉือน (Tensile shear strength) การทดสอบแบบดึงกนกบาท (Cross tension test) และการลอกผิว (Peel test) เป็นหลัก หากมีการทดสอบความล้าตัวของรอยต่อเกยจะทำให้คาดการณ์ถึงอายุการใช้งานในอนาคตได้

- เนื่องจากรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กกล้าเป็นการต่อวัสดุแบบกัลวานิก (Galvanic couple) และเป็นการต่อเกยที่มีมุมอับเกิดขึ้น ดังนั้นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อนของรอยต่อ ควรมีการศึกษาต่อไป

7. สรุป

บทความนี้นำเสนอข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้การเชื่อมด้านทานแบบจุดในการเชื่อมอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กกล้า พบข้อมูลที่น่าสนใจดังนี้

7.1 การเชื่อมด้านทานแบบจุดสามารถใช้ในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กกล้าได้ แต่ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมต้องทำการพิจารณาต่อไป



- 7.2 การก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อเป็นสิ่งที่ต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ เนื่องจากความหนาและชนิดของสารประกอบกึ่งโลหะส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของรอยต่อ
- 7.3 การวิจัยและพัฒนาสมบัติของรอยต่อ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กกล้า ควรมีการดำเนินการต่อไปในกลุ่มของวัสดุที่มีการใช้งานในงานอุตสาหกรรม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Vural, M., Akkus, A. and Eryurek, B. 2006. Effect of Welding nugget diameter on the fatigue strength of the resistance spot welded joints of different steel sheets. J. of Materials Processing Technology, 176: 127-132.
- [2] <http://www.millerwelds.com/pdf/Resistance.pdf>, August 4, 2010.
- [3] Qiu, R., Shi, H., Zhang, K., Tu, Y., Iwamoto, C. and Satonaka, S. 2010. Interfacial characterization of joint between mild steel and aluminum alloy welded by resistance spot welding. Materials Characterization, 61: 684-688.
- [4] Askeland, D.A. and Phule, P.P. 2006. The Science and Engineering of Materials. Singapore, Thomson Learning.
- [5] Aslanlar, A., Qgur, A., Ozasarac, U., Ilhan, E. and Demir, Z. 2007. Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding. Materials and Design, 28: 2-7.
- [6] ASM International. 2000. ASM Handbook Volume 6 Welding, Brazing and Soldering. Ohio, ASM International.
- [7] นิวัฒน์ คุณนางค์. 2551. วิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา เรื่อง การศึกษาผลกระทบของรอยเชื่อมเนื่องจากการเตรียมสภาพผิวหน้าของอลูมิเนียมผสมในการเชื่อมด้วยความต้านทานชนิดจุด. กรุงเทพมหานคร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [8] Kattner, U.R. and Massalski, T.B. 1990. Binary Alloy Phase Diagrams. ASM International, Material Park, OH, P.147.
- [9] S. Kobayashi and T. Yakou. 2002. Control of Intermetallic Compound Layers at Interface between Steel and Aluminum by diffusion-treatment. Mater. Sci. and Eng. A, 338:44-53.
- [10] Sun, X., Stephens, E.V., Khaleel, M.A., Shao, H. and Kimchi, M. 2004. Resistance Spot Welding of

Aluminum Alloy to Steel with Transition Materials – From Process to Performance – Part I: Experimental Study. Welding Journal, 84-6: 188s-195s.

- [11] Qiu, R, Iwamoto, C. and Satonaka, S. 2009. The Influence of reaction layer on the strength of aluminum/ steel joint welded by resistance spot welding. Materials Characterization, 60: 156-159.

Qiu, R, Iwamoto, C. and Satonaka, S. 2009. Interfacial microstructure and strength of steel/aluminum alloy joints welded by resistance spot welding with cover plate. J. of Materials Processing Technology, 209: 4186-4193.