

Unit 4

กรรมวิธีการเชื่อม : กลุ่มไม่เติมลวดเชื่อม Welding Processes : Non Consumable



ที่มา : Friction Welding Holland, 2011



ที่มา : Water Welders. Updated, 2022

จุดประสงค์การเรียนรู้ บทที่ 4 กรรมวิธีการเชื่อม : กลุ่มไม่เติมลวดเชื่อม

- รู้และเข้าใจถึงกรรมวิธีการเชื่อมกลุ่มที่สามารถเชื่อมได้แบบไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenous)
 - รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมออกซิอะเซทิลีนและการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสตีลและอลูมิเนียม (OAW และGTAW)
 - รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทานและการเชื่อมสลักเกลียว (RW และSW)
 - รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทานและการเชื่อมเทอร์มิต (FRW และTW)
 - รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมด้วยอาร์กพลาสมา (PAW)
 - รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์ และการเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน (LBW และEBW)
-

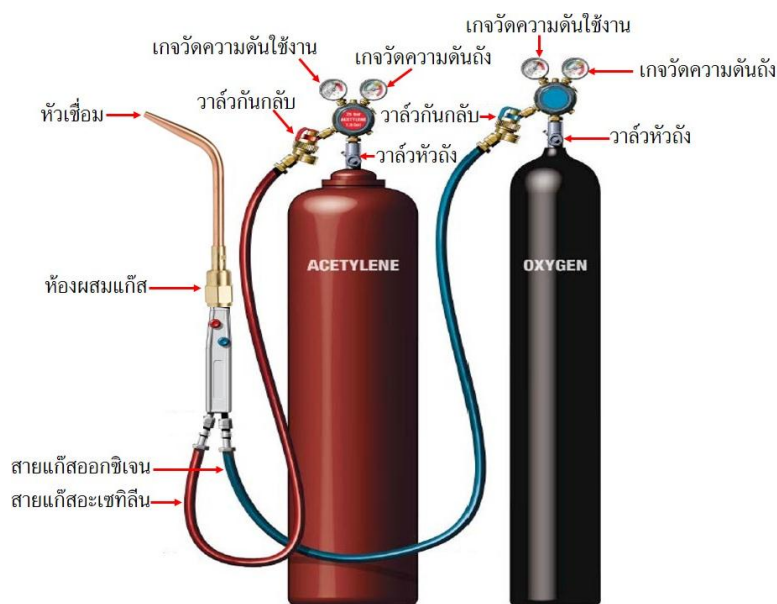
“Welding Processes” ที่ได้กล่าวไว้ในบทก่อนหน้านี้เป็นกลุ่มประเภทของการเชื่อมแบบหลอมละลายที่จำเป็นต้องใช้เนื้อโลหะจากลวดเชื่อมเติมเข้าไปทำหน้าที่ประสานโลหะให้ติดกัน (Filler metals) แต่สำหรับในบทเรียนนี้เป็นกลุ่มประเภทของกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายที่สามารถเชื่อมได้ทั้งแบบที่ให้โลหะติดกันด้วยการเติมเนื้อลวดเชื่อม (Filler metals) และแบบที่ให้โลหะติดกันโดยไม่ต้องใช้การเติมลวดเชื่อม (Autogenous) โดยเฉพาะการเชื่อมแบบไม่ต้องเติมลวดเชื่อมนั้นเหมาะสมอย่างยิ่งกับการเชื่อมโลหะจำพวกแผ่นบางหรือท่อบาง ซึ่งอาศัยน้ำโลหะจากการอาร์กที่บ่อหลอมละลายของทั้งสองชิ้นโลหะงานไหลเข้ามาผสมกัน โดยใช้หลักการส่ายของหัวเชื่อม (Weave patterns) เป็นตัวช่วยให้ชิ้นงานติดกันได้ดีและยังเป็นตัวช่วยในการควบคุมขนาดความกว้างของแนวเชื่อม การเชื่อมโลหะแบบไม่เติมเนื้อลวดเชื่อมนี้ แนวเชื่อมที่ได้มีลักษณะแบนราบ ไม่นูน ไม่เน้นความแข็งแรงของแนวเชื่อม แต่จะเน้นความสวยงามของแนวเชื่อมเป็นสำคัญ หรือบางครั้งต้องการเน้นความเรียบผิวของแนวเชื่อมเพื่อนำไปประกอบกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ต่อไปที่พบเห็นกันบ่อย ๆ มักจะเป็นการเชื่อมประกอบผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อเน้นความสวยงามของเครื่องใช้ภายในบ้าน หรืองานเชื่อมประกอบโลหะแผ่นของชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น ดังนั้น ในบทนี้จะกล่าวถึงกรรมวิธีการเชื่อมที่สามารถเชื่อมได้แบบไม่ต้องเติมลวดเชื่อมที่นิยมใช้งานกัน ได้แก่

1. กรรมวิธีการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (Oxy-Acetylene Welding : OAW)
2. กรรมวิธีการเชื่อมอาร์กทั้งสเดนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW)
3. กรรมวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance Welding : RW)
4. กรรมวิธีการเชื่อมสลักเกลียว (Stud Arc Welding : SW)
5. กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทาน (Friction Welding : FRW)
6. กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิต (Thermit Welding : TW)
7. กรรมวิธีการเชื่อมด้วยอาร์กพลาสมา (Plasma Arc Welding : PAW)
8. กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser Beam Welding : LBW)
9. กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Welding : EBW)

4.1 การเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (Oxy-Acetylene Welding : OAW)

เป็นกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายที่อาศัยความร้อนจากการเผาไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิงกับแก๊สออกซิเจน โดยแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้งานมักนิยมใช้เป็นแก๊สอะเซทิลีน (Acetylene : C_2H_2) เพราะเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่ให้พลังงานความร้อนสูงที่สุดที่ประมาณ $3,316\text{ }^{\circ}C$ จึงเรียกระบบวิธีการเชื่อมนี้ว่า “การเชื่อมแก๊สออกซิอะเซทิลีน” สามารถเชื่อมได้ทั้งแบบเติมลวดเชื่อมและไม่เติมลวดเชื่อม โดยมีระบบวงจรและอุปกรณ์การเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.1 เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวางที่สามารถเชื่อมได้ทั้งวัสดุจำพวกโลหะกลุ่มเหล็ก (Ferrous metals) และโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous metals) ด้วยเหตุที่การสร้างบ่อหลอมละลายขณะเชื่อมจะใช้หลักการเผาผิวงานจนหลอมด้วย

แก๊สจึงต้องใช้เวลามาก ซึ่งแตกต่างจากการเชื่อมอาร์กจึงไม่นิยมเชื่อมโลหะที่หนาแต่นิยมใช้เชื่อมโลหะแผ่นบางหรือท่อบาง หรือโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำที่ไม่สามารถเชื่อมด้วยวิธีการอาร์กได้ วิธีการเชื่อมนี้ไม่นิยมเชื่อมงานที่มีปริมาณมาก ๆ เพราะปริมาณของความร้อนมาจากสัดส่วนแก๊สผสมที่เหมาะสมและถูกต้อง ถ้าปริมาณแก๊สลดน้อยลงก็มีผลต่อการควบคุมเปลวไฟขณะเชื่อม ดังนั้น มักพบการเชื่อมด้วยกรรมวิธีนี้ในงานวิศวกรรมซ่อมบำรุงหรืองานปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ โดยเฉพาะงานภาคสนามที่ไม่มีพลังงานกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมออกซิอะเซทีลีน (OAW)

ที่มา : ADOR WELDING, Technical Newsletter, 2012

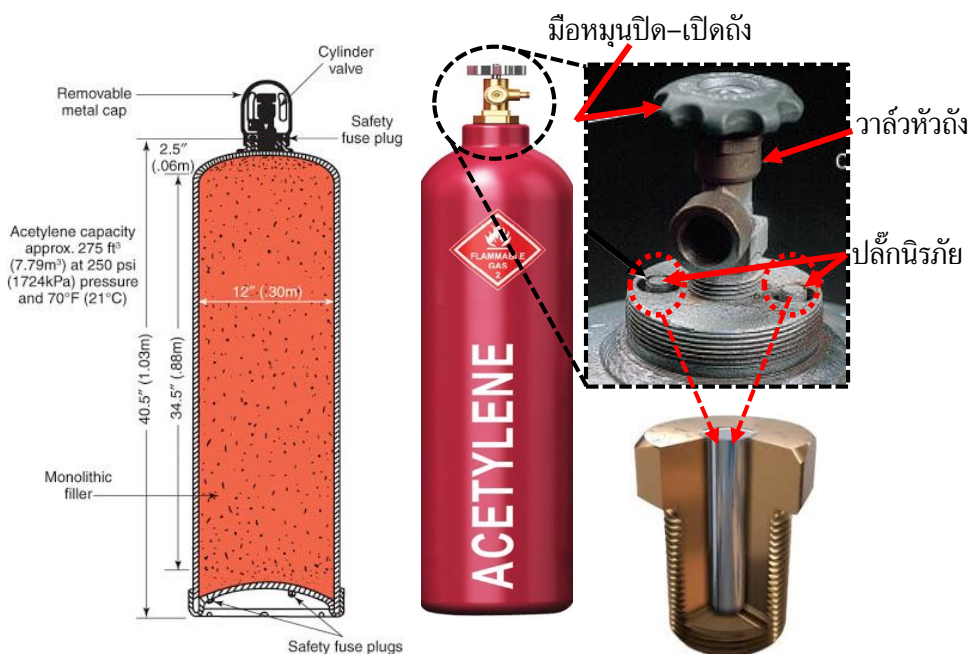
4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเชื่อมออกซิอะเซทีลีน (Tool and equipment of OAW)

การเชื่อมโลหะด้วยแก๊สออกซิอะเซทีลีนเป็นขบวนการเชื่อมที่ไม่สลับซับซ้อนมากนัก แต่ประกอบด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์หลายชิ้นส่วน โดยเน้นความปลอดภัยที่อาจเกิดจากการระเบิดของถังความดันจากแก๊สอะเซทีลีนและจากแก๊สออกซิเจน จึงประกอบไปด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด อุปกรณ์ป้องกันอันตราย และอุปกรณ์การเชื่อมดังรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. **ถังแก๊สอะเซทีลีน (Acetylene cylinder)** เป็นถังบรรจุแก๊สติดไฟอะเซทีลีน (C_2H_2) ที่ผลิตได้จากการนำแคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) ผสมกับน้ำ โดยคาร์บอนที่อยู่ในแคลเซียมคาร์ไบด์กับไฮโดรเจนที่อยู่ในน้ำเกิดการรวมตัวกันเป็นแก๊สอะเซทีลีนขึ้นมา จากนั้นทำการอัดบรรจุเข้าไปเก็บไว้ในถังภาชนะเก็บความดันดังแสดงลักษณะของถังอะเซทีลีนในรูปที่ 4.2 (ก) ซึ่งที่หัวถังอะเซทีลีนมีวาล์วปิด-เปิด เหตุผลเพราะเป็นแก๊สที่ติดไฟได้ง่ายจึงต้องมีระบบป้องกันอันตรายจากกรณีไฟย้อนกลับไปลุกไหม้ในถัง

หรือถึงได้รับความร้อนจากภายนอก จึงต้องมีระบบปลั๊กนิรภัย (Safety fuse plugs) พร้อมทั้งจะหลอมละลายและปล่อยแก๊สภายในออกมาเพื่อลดการระเบิดของถัง ปลั๊กนิรภัยทำจากโลหะตะกั่วหรือโลหะอื่นที่มีจุดหลอมเหลวต่ำติดตั้งไว้ที่หัวถังและก้นถัง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข)

การควบคุมแก๊สอะเซทิลีนต้องอยู่ภายใต้ระดับความดันที่มากกว่า 30 ปอนด์/ตารางนิ้ว หรือ 21 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร แก๊สอะเซทิลีนจะไม่สามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้หรือควบคุมไม่ได้ ถ้าหากอุณหภูมิสูงเกิน 1,435 °C จะเกิดการระเบิด จากคุณลักษณะดังกล่าวของแก๊สอะเซทิลีนจึงควรนำแก๊สอะเซทิลีนไปใช้งานที่ความดันไม่เกิน 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว หรือ 1.05 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร พบว่าในทางปฏิบัติของขบวนการบรรจุแก๊สอะเซทิลีนลงถังกระทำที่ความดัน 220–225 ปอนด์/ตารางนิ้ว ซึ่งที่ความดันระดับนี้เสี่ยงต่อการระเบิดของแก๊ส เทคนิคการลดความเสี่ยงนี้ทำได้โดยการนำสารอะซิโตน (Acetone) และวัสดุพูนต่าง ๆ ใส่ไว้ภายในถังก่อนเพื่อทำหน้าที่ดูดซับแก๊สอะเซทิลีนและรักษาเสถียรภาพของแก๊สอะเซทิลีนไว้ภายในถังบรรจุและปล่อยไหลออกมาอย่างสม่ำเสมอขณะเปิดออกมาใช้งานผ่านวาล์วควบคุมที่หัวถัง โดยปกติแล้ว หรือชุดอุปกรณ์ที่ใช้กับแก๊สอะเซทิลีนต้องผลิตจากโลหะทองเหลืองจะไม่ใช่โลหะทองแดงเพราะเมื่อสัมผัสกับแก๊สอะเซทิลีนแล้วจะเกิดเป็นสารประกอบ Copper acetylene ซึ่งอาจก่อให้เกิดการระเบิดได้ นอกจากนี้การจัดเก็บหรือสถานที่นำไปใช้งานของถังแก๊สต้องหลีกเลี่ยงแหล่งสภาพแวดล้อมที่อาจเกิดประกายไฟ หรือบริเวณที่อาจก่อให้เกิดความร้อนต่อถังแก๊ส



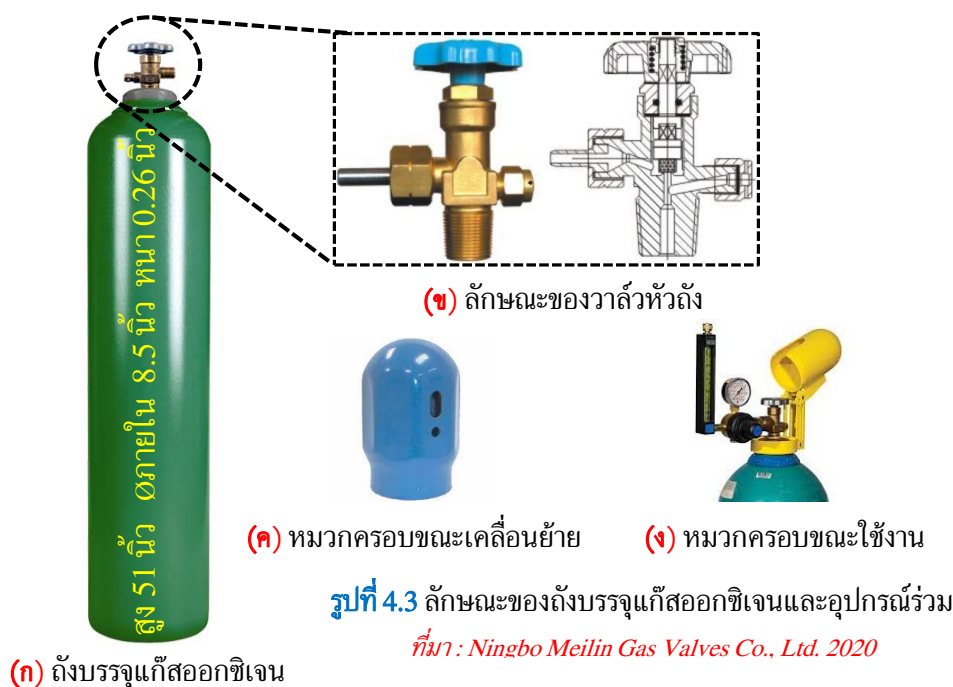
(ก) ลักษณะของถังบรรจุแก๊สอะเซทิลีน

(ข) ลักษณะของปลั๊กนิรภัย

รูปที่ 4.2 ลักษณะของถังบรรจุแก๊สอะเซทิลีนและระบบปลั๊กนิรภัย

ที่มา : Acetylene Supply, Halverson CTS Newsletter, 2012

2. **ถังแก๊สออกซิเจน (Oxygen cylinder)** ออกซิเจนเป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟแต่เป็นตัวช่วยให้ไฟติด การนำใช้ในการเชื่อมจะทำหน้าที่ช่วยให้เกิดการเผาไหม้หรือเกิดเปลวไฟกับแก๊สอะเซทิลีน แล้วสร้างอุณหภูมิความร้อนที่สูงมากที่สามารถหลอมละลายโลหะได้ การบรรจุหรือเก็บแก๊สออกซิเจนจะทำการอัดลงถังหรือท่อเหล็กกล้าคาร์บอนสูงที่ไม่มีตะเข็บที่มีขนาดมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) โดยมีประกอบวาล์วปิด-เปิด ไว้ที่หัวถังดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ข) ซึ่งวาล์วเป็นโลหะทองเหลืองที่ทนต่อความดันได้สูงถึง 2,200 ปอนด์/ตารางนิ้วที่อุณหภูมิ 20 °C ซึ่งภายในวาล์วหัวถังนี้มีระบบซีล (Seal) ป้องกันแก๊สรั่วและมีก้านวาล์วคอยปิด-เปิดแก๊สเมื่อต้องการใช้ และเมื่อทำการเคลื่อนย้ายถึงต้องนำหมวกครอบป้องกันวาล์ว (Protective cap) หมุนเข้ากับหัวถังให้เรียบร้อยก่อนเพื่อเป็นการปกป้องอุปกรณ์วาล์วที่หัวถัง และยังเป็น การเพิ่มความง่ายสะดวกในการเคลื่อนอีกด้วย นอกจากนี้ขณะที่เปิดแก๊สใช้งานก็ต้องต่อเข้ากับเกจวัดความดัน (Pressure regulator) ซึ่งต้องมีหมวกครอบป้องกันที่เป็นแบบขณะถึงกำลังใช้งาน ดังแสดงลักษณะของหมวกครอบทั้งสองแบบในรูปที่ 4.3 (ค) และ (ง) ตามลำดับ



3. **อุปกรณ์มาตรวัดความดันแก๊ส (Pressure regulator)** กรรมวิธีการเชื่อมออกซิอะเซทิลีนมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการวัดความดันของแก๊สทั้งแก๊สอะเซทิลีนและแก๊สออกซิเจน ซึ่งใช้สำหรับการควบคุมระดับความดันของแก๊สขณะนำออกมาใช้งาน และใช้สำหรับวัดระดับปริมาณความดันของแก๊สที่เหลืออยู่ภายในถังบรรจุแก๊สผู้ปฏิบัติงานเชื่อม ซึ่งโดยปกติแล้วระดับความดันของแก๊สใช้งานจะต่ำกว่าระดับความดันของแก๊สภายในถังบรรจุ ดังนั้น มาตรวัดหรือเกจวัด (Gage) ที่ใช้จึงต้อง

แตกต่างกันตามระดับของความดันของทั้งแก๊สอะเซทิลีนและแก๊สออกซิเจนดังแสดงในรูปที่ 4.4 และมีรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- เกจวัดความดันสูง (High pressure gage) เป็นเกจที่ใช้สำหรับวัดความดันของแก๊สที่อยู่ภายในถังบรรจุแก๊สซึ่งจะมีระดับความดันที่สูง โดยทั่วไปเกจที่ใช้วัดความดันแก๊สอะเซทิลีนสามารถวัดได้สูงสุด 350 ปอนด์/ตารางนิ้ว ส่วนเกจที่ใช้วัดความดันแก๊สออกซิเจนวัดได้สูงสุด 3,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว

- เกจวัดความดันต่ำ (Low pressure gage) เป็นเกจที่ใช้สำหรับวัดระดับของความดันแก๊สที่นำออกมาใช้งานซึ่งเป็นด้านที่ต่อเข้ากับหัวเชื่อม ซึ่งสามารถวัดความดันของแก๊สอะเซทิลีนได้ที่ระดับสูงสุด 30 ปอนด์/ตารางนิ้ว และปรับใช้งานที่ความดันไม่เกิน 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว ส่วนเกจสำหรับวัดความดันของแก๊สออกซิเจนสามารถวัดได้สูงสุด 400 ปอนด์/ตารางนิ้ว และปรับใช้งานที่ความดันไม่เกิน 25 ปอนด์/ตารางนิ้ว โดยช่างเชื่อมสามารถทำการปรับความดันไปใช้งานตามความต้องการด้วยการปรับ หมุนสกรูปรับความดัน (Adjusting screw)



รูปที่ 4.4 เกจวัดความดันของแก๊สอะเซทิลีนกับแก๊สออกซิเจน

ที่มา : Harris Industrial. 2020

แก๊สอะเซทิลีนและแก๊สออกซิเจนเป็นของไหลที่ต้องไหลผ่านท่อสายยางหรือสายเชื่อมนำไปสู่หัวเชื่อม ซึ่งถ้าสายเชื่อมยาวจะส่งผลทำให้ความดันใช้งานของแก๊สลดลง ดังนั้น ช่างเชื่อมต้องทราบถึงความยาวของสายเชื่อมเพื่อที่จะสามารถปรับระดับปริมาณของความดันแก๊สให้มากเพียงพอกับการเชื่อม โดยได้มีการทดลองหาความสัมพันธ์ของความยาวของสายเชื่อมกับระดับความดันใช้งานที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อระยะความยาวของสายเชื่อมเพิ่มมากขึ้นความดันของแก๊สภายในสายเชื่อมที่ต้องปรับที่เกจวัดหัวถังจะเพิ่มสูงขึ้นตาม ดังนั้น ถ้าเป็นไปได้สายเชื่อมควรจะต้องมีความยว่น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เช่น จากผลของตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ถ้าต้องการ

ความดันที่หัวทิฟเชื่อม 1 ปอนด์/ตารางนิ้ว สายเชื่อมยาว 10 ฟุต ปรับความดันที่เกจวัดหัวถึง 1 ปอนด์/ตารางนิ้ว ซึ่งความดันไม่เปลี่ยนแปลง แต่ถ้าสายเชื่อมยาวมากขึ้นถึง 25 ฟุต จะต้องปรับความดันที่เกจวัดหัวถึงสูงขึ้นถึง 2.25 ปอนด์/ตารางนิ้ว นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยของขนาดของสายเชื่อมที่ใหญ่ขึ้นหรือเล็กลง หรือปฏิบัติการเชื่อมในที่สูงจะทำให้ความดันภายในสายเชื่อมเกิดเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของความดันแก๊สกับความยาวของสายเชื่อม

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metal Fabrication 2012*.

| ความดันหัวทิฟเชื่อม (psi) | ความดันที่เกจวัดหัวถึง (ขนาดสายเชื่อม ๑ 1/4 นิ้ว หรือ 6 มม) psi | | | | |
|------------------------------|---|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | ระยะ 10 ฟุต | ระยะ 25 ฟุต | ระยะ 50 ฟุต | ระยะ 75 ฟุต | ระยะ 100 ฟุต |
| 1 | 1 | 2.25 | 3.5 | 4.75 | 6 |
| 5 | 5 | 6.25 | 7.5 | 8.75 | 10 |
| 10 | 10 | 11.25 | 12.5 | 13.75 | 15 |

หมายเหตุ : ทำการเชื่อมในสถานที่สูงจากพื้นอัตราการไหลและความดันจะเกิดการเปลี่ยนแปลง

4. สายเชื่อมและข้อต่อ (Welding hose and connection) ทั้งสายเชื่อมและข้อต่อต่าง ๆ มีความสำคัญมากด้านความปลอดภัยในการเชื่อม เพราะกรรมวิธีการเชื่อมออกซิอะเซทิลินจะเกี่ยวข้องกับ แก๊สติดไฟ แรงดันแก๊ส และต้องอ่อนตัวเคลื่อนตัวได้ดี สายเชื่อมและข้อต่อจึงต้องพิจารณาเลือกใช้ และตรวจสอบให้ถูกต้องแม่นยำ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

● สายเชื่อม (Welding hose) มีลักษณะเป็นท่อที่ทำหน้าที่นำส่งแก๊สจากถังบรรจุไปยังหัวทิฟเชื่อม ด้วยเป็นเพราะเป็นแก๊สติดไฟและมีความดันสายเชื่อมจึงต้องมีสมบัติที่ต้อง

- ทนต่อแรงดันได้ดี
- มีความยืดหยุ่นอ่อนตัวได้ดี ง่ายและสะดวกในการเคลื่อนขณะทำการเชื่อม
- ไม่ทำปฏิกิริยากับแก๊สที่ใช้เชื่อม
- ทนต่อการลุกไหม้จากเปลวเพลิงได้ดี

ซึ่งจากสมบัติดังกล่าวข้างต้นของสายเชื่อมที่ดีจึงได้ออกแบบสายเชื่อมให้มีลักษณะเป็น 3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) คือ

- ชั้นนอก → ทำจากวัสดุยางที่มีความอ่อนตัว มีความเหนียว ซึ่งจะเป็นชั้นที่บางสุด
- ชั้นกลาง → ทำจากวัสดุยางที่มีความแข็ง แต่มีความยืดหยุ่นตัวดี
- ชั้นใน → ทำจากวัสดุยางที่มีความคงทนต่อความดันแก๊ส มีความหนามากที่สุด

ซึ่งการประกอบของแต่ละชั้นของท่อจะสานด้วยใยผ้าเพื่อความคงทนต่อความดันที่สูงของแก๊ส โดยมาตรฐานสายเชื่อมหรือท่อที่ยอมรับเลือกใช้งานกันมีอยู่ 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) และ (ค) ซึ่งสายอะเซทิลินออกแบบเป็นสีแดง ส่วนสายออกซิเจนออกแบบเป็นสีเขียวหรือน้ำเงิน ดังนี้

1. แบบสายเดี่ยว (Single welding hose) เป็นสายเชื่อมที่แยกออกจากกันระหว่างสายของอะเซทิลีนกับสายของออกซิเจน

2. แบบสายคู่ (Double welding hose) เป็นสายเชื่อมที่สายของอะเซทิลีนกับสายของออกซิเจนอยู่คู่ติดกัน

การวัดและเลือกขนาดของสายเชื่อมออกซิอะเซทิลีน จะใช้วิธีการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูภายในของท่ออย่างซึ่งมีหลายขนาด เช่น ขนาด 3/16 นิ้ว (4.6 มม) 1/4 นิ้ว (6 มม) 5/16 นิ้ว (7.8 มม) 3/8 นิ้ว (9.3 มม) หรือ 1/2 นิ้ว (12.5 มม) เป็นต้น



(ก) ลักษณะส่วนประกอบของสายเชื่อมออกซิอะเซทิลีน



(ข) แบบสายเดี่ยว (Single welding hose)

(ค) แบบสายคู่ (Double welding hose)

รูปที่ 4.5 สายเชื่อมสำหรับการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน

ที่มา : Harris Industrial. 2020

● ข้อต่อ (Connector) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันของระบบการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน เพื่อให้สามารถใช้งานได้จะมาจากโลหะทองเหลืองเท่านั้น เพราะไม่ทำปฏิกิริยากับแก๊สอะเซทิลีนและแก๊สออกซิเจน ซึ่งต่างจากโลหะทองแดงที่จะทำปฏิกิริยากับแก๊สอะเซทิลีน ข้อต่อที่ใช้งานกันประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ คือ

1. นัต (Nut) มีลักษณะภายนอกเป็นหกเหลี่ยม มีเกลียวอยู่ด้านในใช้คู่กับน๊อปเปิล โดยใช้ประกอบเข้ากับด้านอุปกรณ์ปรับความดันและด้านหัวเชื่อม ตัวนัตสำหรับแก๊สออกซิเจนประทับอักษรคำว่า STD.OXY ส่วนตัวนัตสำหรับแก๊สอะเซทิลีนประทับอักษรคำว่า STD.ACET โดยนัตที่ใช้กับแก๊ส

อะเซทิลีนจะบากร่องตรงกลางไว้ เพื่อบอกเป็นสัญลักษณ์ว่าเป็นเกลียวหมุนซ้าย ส่วนนัตของแก๊สออกซิเจนจะไม่มีร่องบากเพื่อบอกว่าเป็นเกลียวหมุนขวา

2. นิปเปิล (Nipple) มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกสอดอยู่ในรูของนัต ส่วนปลายทางจะมีรูปร่างเรียวและขึ้นเป็นลอนเพื่อใช้สวมเข้ากับสายเชื่อมให้แน่นและไม่รั่วซึม



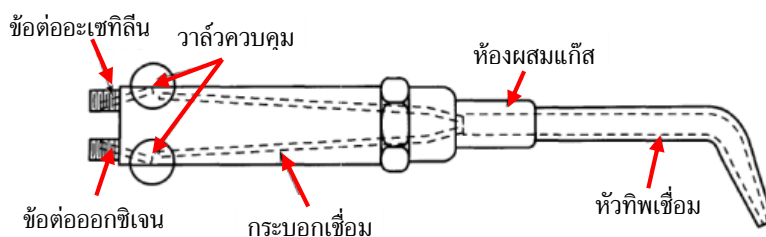
(ก) ข้อต่อสำหรับแก๊สอะเซทิลีน (ข) ข้อต่อสำหรับแก๊สออกซิเจน (ค) การใช้งานข้อต่อ

รูปที่ 4.6 ข้อต่อสำหรับการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน

ที่มา : Harris Industrial. 2020

5. หัวเชื่อมและหัวทิพเชื่อม (Torch and Tip) หัวเชื่อมหรือทอร์ชเชื่อมและหัวทิพเชื่อมเป็นอุปกรณ์ที่ประกอบอยู่ร่วมกันซึ่งมีความสำคัญมากของกรรมวิธีการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน โดยต้องต่อเข้ากับสายเชื่อมแล้วทำการผสมแก๊สในห้องผสม (Mixing chamber) ก่อนที่จะออกไปสู่หัวทิพเชื่อมเพื่อจุดไฟแล้วรับเปลวไฟเชื่อม โดยจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของหัวเชื่อมและหัวทิพเชื่อมดังต่อไปนี้

• หัวเชื่อม (Welding torch) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างยิ่งซึ่งบางครั้งเรียกว่า “ทอร์ชเชื่อม หรือ กระบอกเชื่อม” โดยมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 4.7



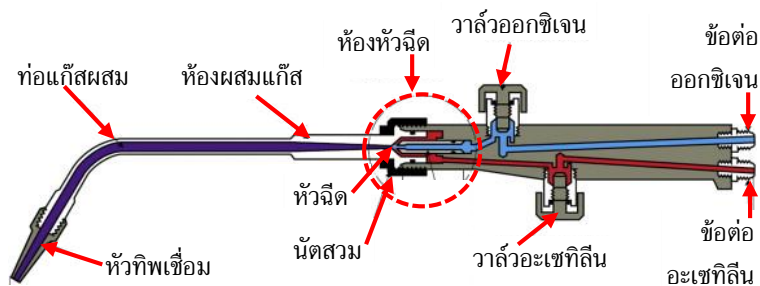
รูปที่ 4.7 ส่วนประกอบของหัวเชื่อมออกซิอะเซทิลีน

ที่มา : Wel Cor Supplies Inc. Product Catalogue Industrial. 2016

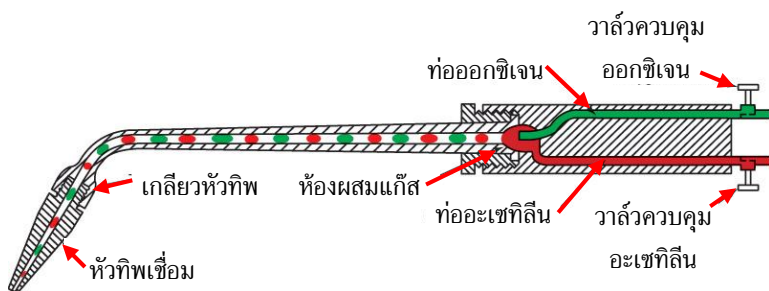
เป็นที่ทราบกันดีว่าแก๊สอะเซทิลีนที่เป็นแก๊สเชื้อเพลิงป้อนสำหรับการเชื่อมนั้น ได้จากการผลิตจากเครื่องกำเนิดแก๊สอะเซทิลีน (Acetylene generator) โดยตรง ซึ่งมีความดันที่ไม่สูงมากนัก กับชนิดที่ได้จากถังบรรจุแก๊สอะเซทิลีน (Acetylene cylinder) บางครั้งเรียกว่า “ถังสำเร็จ” ซึ่งมีระดับของความดันที่ค่อนข้างสูง ด้วยเหตุที่แหล่งป้อนแก๊สอะเซทิลีนเข้าสู่หัวเชื่อมมีระดับความดันที่แตกต่างกัน จึงได้สร้างหัวเชื่อมที่สามารถรองรับได้ตามระดับของความดันแก๊สขึ้น โดยมีหัวเชื่อม 2 แบบ คือ

1. หัวเชื่อมแบบหัวฉีด (Injector type) เป็นหัวเชื่อมที่เหมาะสมกับการใช้แก๊สอะเซทิลีนจากเครื่องกำเนิดแก๊สอะเซทิลีนป้อนเข้าสู่หัวเชื่อมซึ่งความดันค่อนข้างต่ำ โดยหัวเชื่อมแบบหัวฉีดนี้ได้ออกแบบโครงสร้างภายในให้ออกซิเจนที่มีความดันสูงไหลผ่าน และความเร็วของการไหลนี้จะทำให้เกิดสูญญากาศดูดเอาแก๊สอะเซทิลีนเข้าไปด้วย ไหลเข้าไปรวมตัวกันในห้องผสมแก๊สก่อนออกไปยังหัวทิพเชื่อม ดังแสดงลักษณะของหัวเชื่อมแบบหัวฉีดและส่วนประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก)

2. หัวเชื่อมแบบความดันสมดุล (Equal pressure type) เป็นหัวเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมที่ได้รับแก๊สอะเซทิลีนที่ป้อนจากถังบรรจุ ซึ่งมีความดันสูง โดยออกแบบหัวเชื่อมให้สามารถปรับแก๊สทั้งสองให้มีความดันเท่ากันแล้วไหลเข้าสู่ห้องผสมแก๊สแล้วไหลต่อไปสู่หัวทิพเชื่อม ดังแสดงลักษณะของหัวเชื่อมแบบสมดุลและส่วนประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ข)



(ก) หัวเชื่อมแบบหัวฉีด (Injector type)



(ข) หัวเชื่อมแบบความดันสมดุล (Equal pressure type)

รูปที่ 4.8 ชนิดของหัวเชื่อมออกซิอะเซทิลีน

ที่มา : M. Vural, Comprehensive Materials Processing, 2014

● หัวทิวเชื่อม (Welding torch) เป็นอุปกรณ์ส่วนปลายสุดที่ใช้ประกอบเข้ากับหัวเชื่อมหรือทอร์ชเชื่อม และเป็นช่องทางผ่านของแก๊สผสมพร้อมทั้งเป็นตัวกำหนดทิศทางและปริมาณของเปลวไฟ เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะของงาน หัวทิวเชื่อมมีให้เลือกใช้ 2 แบบ คือ

1. หัวทิวแบบขึ้นเดียว หัวทิวแบบนี้จะเป็นแบบขึ้นเดียวยาวตลอดซึ่งหัวเกลียวต่อเข้ากับกระบอกเชื่อมที่ยึดด้วยน็อตเกลียว ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก)
2. หัวทิวแบบแยกชิ้น หัวทิวแบบนี้มี 2 ชิ้นส่วน คือ ชิ้นส่วนตรงปลายและตรงโคน ประกอบเข้าด้วยกันโดยใช้เกลียวแล้วจึงนำไปประกอบเข้ากับหัวเชื่อมหรือทอร์ชเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ข)



รูปที่ 4.9 ชนิดของหัวทิวเชื่อมของหัวเชื่อมออกซิอะเซทิลีน

ที่มา : Harris Welding Supplies, 2019

6. อุปกรณ์ที่สำคัญอื่น ๆ (Other equipment) นอกจากอุปกรณ์ที่กล่าวมาแล้วนั้นยังมีอุปกรณ์อื่น ๆ ที่จำเป็นในขบวนการเชื่อมแก๊สออกซิอะเซทิลีน ได้แก่

1. แว่นตาเชื่อมแก๊ส (Gas goggles) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก) แว่นตาเชื่อมแก๊สใช้สำหรับป้องกันตาเนื่องจากแสงเชื่อมหรือสะเก็ดเชื่อม ซึ่งต้องมีคุณสมบัติถ่ายเทอากาศได้ดีในขณะสวมใส่ การเลือกกระจกเลนส์กรองแสงต้องเลือกให้เหมาะสม เช่น เลนส์ 5-6 ใช้สำหรับเชื่อมโลหะแผ่นหนา ส่วนเลนส์เบอร์ 4 ใช้สำหรับแผ่นบาง เป็นต้น

2. อุปกรณ์จุดไฟแก๊ส (Spark lighter) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ข) เป็นอุปกรณ์เฉพาะที่ออกแบบไว้สำหรับการทำให้เกิดประกายไฟเพื่อนำไปจุดแก๊สที่ปลายของหัวทิวเชื่อม ตัวของอุปกรณ์จะมีด้วยประกอบติดอยู่บริเวณปลายของขาด้านหนึ่ง อีกด้านหนึ่งประกอบด้วยแกนถ่านภายใน และในถ้วยมีแกนเหล็กกลมมีผิวคล้ายตะไบ ขณะใช้จุดเปลวไฟควรให้ปลายของหัวทิวอยู่ห่างจากถ้วยประมาณ 1 นิ้ว แก๊สจะถูกปล่อยและอยู่ภายในถ้วยจำนวนหนึ่งช่วยให้เกิดการจุดระเบิดได้ง่าย เมื่อใช้มือบีบให้แกนถ่านถูกับแท่งเหล็กและเกิดประกายไฟ แกนถ่านนี้สามารถถอดเปลี่ยนด้วยเกลียวเมื่อใช้จนกระทั่งสึกหรอและแกนถ่านหมดไป

3. อุปกรณ์ป้องกันไฟกลับ (Back pressure valve) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ค) เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งกับถังผลิตแก๊สอะเซทิลีน ส่วนถังอะเซทิลีนแบบถังสำเร็จจะติดตั้งกับระบบการจ่ายแก๊สแบบท่อร่วม (Mandifolled) หม้อกันไฟกลับจะช่วยไม่ให้แก๊สหรือไฟย้อนกลับมาระหว่างถังผลิตหรือถังจ่ายกับสายเชื่อม ภายในหม้อจะบรรจุน้ำไว้ ทุก ๆ ครั้งที่จะใช้งานต้องตรวจสอบระดับน้ำก่อน

4. วาล์วกันแก๊สไหลย้อน (Check valve) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ง) วาล์วป้องกันการไหลย้อนกลับของแก๊สแบบนี้จะประกอบติดที่เกลียวบริเวณด้านของหัวเชื่อมก่อนประกอบเข้ากับข้อต่อของสายเชื่อม เมื่อแก๊สผ่านไปตามท่อสายเชื่อมภายในวาล์วจะดันลูกบอลขนาดเล็ก และลูกบอลก็จะไปดันสปริง แก๊สจะผ่านลูกบอลและสปริงเข้าไปในหัวเชื่อม ถ้ามีความดันแก๊สไหลย้อนคืนมาแก๊สก็จะช่วยสปริงดันลูกบอลกลบปิดรูทางออกแก๊สไม่สามารถย้อนคืนออกไปได้

5. อุปกรณ์ทำความสะอาดหัวทิพ (Tip cleaner) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (จ) เป็นอุปกรณ์ใช้ทำความสะอาดหัวทิพ มีลักษณะเป็นลวดกลมเส้นเล็ก ผิวคล้ายกับตะไบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน ใช้ทำความสะอาดหัวทิพโดยที่ไม่ทำให้รูของหัวทิพขยายใหญ่ขึ้น จะทำให้เป็นชุดหรือดัลป์ ซึ่งแต่ละชุดจะมีจำนวนของเส้นลวดไม่เท่ากัน เช่น 22 เส้น 13 เส้น หรือ 9 เส้น เป็นต้น



(ก) หน้ากากเชื่อมแก๊ส



(ข) อุปกรณ์จุดไฟแก๊ส



(ค) อุปกรณ์หม้อกันไฟกลับ



(ง) วาล์วกันแก๊สไหลย้อน



(จ) อุปกรณ์ทำความสะอาดหัวทิพ

รูปที่ 4.10 อุปกรณ์อื่น ๆ ที่สำคัญของการเชื่อมออกซิอะเซทิลิน

ที่มา : Harris Welding Supplies, 2019

4.1.2 เปลวไฟการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (Welding flame)

การเชื่อมโลหะด้วยแก๊สเชื้อเพลิงกับแก๊สออกซิเจน สามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิดได้แก่ อะเซทิลีน (C_2H_2) โพรเพน (C_3H_8) โพรพิลีน (C_3H_6) และแก๊สธรรมชาติ (Natural gas) ซึ่งแต่ละชนิดจะให้พลังงานความร้อนที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยช่างเชื่อมสามารถเลือกใช้ระดับค่าความร้อนตามความเหมาะสมกับลักษณะของงานโดยเฉพาะความหนาของโลหะงานเชื่อมที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปนิยมใช้แก๊สอะเซทิลีน เพราะให้พลังงานความร้อนที่สามารถหลอมละลายโลหะสูงมากถึง $3,316\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสัดส่วนของอะเซทิลีนกับออกซิเจนที่ผสมกันสามารถปรับสัดส่วนได้และให้ปริมาณความร้อนต่างกัน และมีชื่อเรียกเปลวไฟที่ได้แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ชนิดของแก๊สเชื้อเพลิงที่เลือกใช้และอุณหภูมิสูงสุด

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metal Fabrication 2012*.

| ชนิดของแก๊สเชื่อม (Type of gas welding) | อุณหภูมิสูงสุดโดยประมาณ (Temperature) |
|--|--|
| ออกซิเจน (O) + อะเซทิลีน (C_2H_2) | $3,316\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือ $6,000\text{ }^{\circ}\text{F}$ |
| ออกซิเจน (O) + โพรเพน (C_3H_8) | $2,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือ $4,600\text{ }^{\circ}\text{F}$ |
| ออกซิเจน (O) + ไฮโดรเจน (H) | $3,400\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือ $4,300\text{ }^{\circ}\text{F}$ |
| อากาศ (Air) + อะเซทิลีน (C_2H_2) | $5,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือ $4,600\text{ }^{\circ}\text{F}$ |
| อากาศ (Air) + โพรเพน (C_3H_8) | $1,750\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือ $3,200\text{ }^{\circ}\text{F}$ |

ตารางที่ 4.3 ระดับอุณหภูมิของเปลวไฟของการเชื่อมแก๊สออกซิอะเซทิลีน

ที่มา : *Material Science Engineering at Tvasta Manufacturing Solutions 2017*

| สัดส่วน ออกซิเจน/อะเซทิลีน | เปลวไฟ (Flame) | อุณหภูมิ (Temperature) | |
|-------------------------------|----------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| | | องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) | องศาฟาเรนไฮต์ ($^{\circ}\text{F}$) |
| 0.8 / 1.0 | Carburizing | 3,065 | 5,550 |
| 0.9 / 1.0 | Carburizing | 3,150 | 5,700 |
| 1.0 / 1.0 | Neutral | 3,100 | 5,600 |
| 1.5 / 1.0 | Oxidizing | 3,427 | 6,200 |
| 1.8 / 1.0 | Oxidizing | 3,482 | 6,300 |
| 2.0 / 1.0 | Oxidizing | 3,370 | 6,100 |
| 2.5 / 1.0 | Oxidizing | 3,315 | 6,000 |

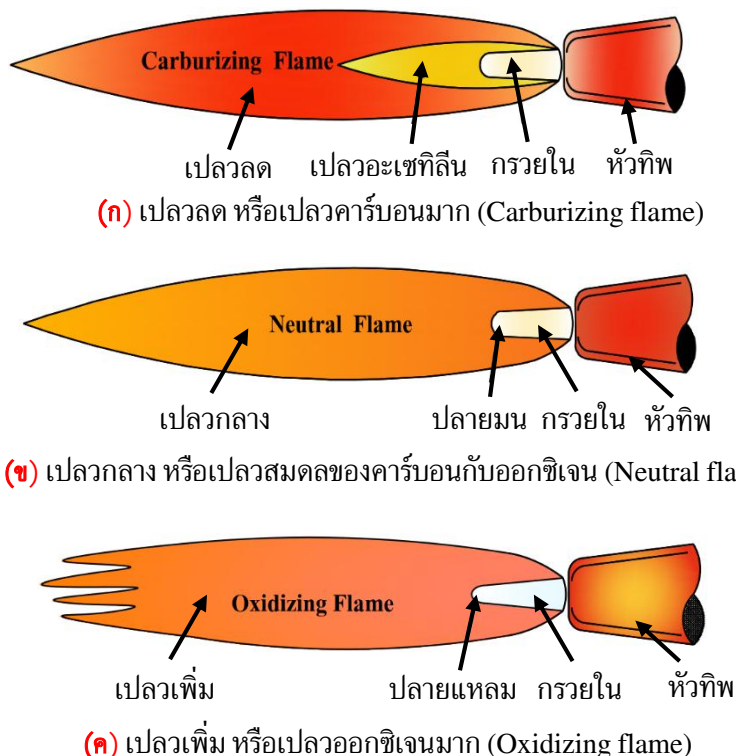
ก. ชนิดของเปลวไฟเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (Type of Oxy-Acetylene flame)

จากลักษณะงานที่ต่างกันมีความจำเป็นของการใช้พลังงานความร้อนที่ไม่เท่ากัน โดยเฉพาะค่าความร้อนเพื่อให้โลหะหลอมละลาย โดยทั่วไปจะแบ่งออกได้ 3 ชนิด โดยอ้างอิงจากบทความที่รวบรวมข้อมูลของขบวนการเชื่อมด้วยแก๊สออกซิอะเซทิลีน Rafael Lucas et al. (2021) คือ

1. เปลวลด หรือเปลวคาร์บูไรซิง (Carburizing flame) เป็นเปลวเชื่อมที่มีปริมาณคาร์บอนมาก เป็นเปลวที่มีสัดส่วนปริมาณของแก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) ที่มากกว่าแก๊สออกซิเจน (O) โดยมีลักษณะเปลวเป็นกรวย 3 ชั้น ซึ่งเปลวชั้นนอกมีลักษณะเป็นเปลวยาวสีส้มล้อมรอบเปลวชั้นใน ซึ่งมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของเปลวชั้นนอก ที่เปลวชั้นในจะมีอุณหภูมิประมาณ $2,800^\circ C$ การเผาไหม้ของเปลวไฟจะเกิดการหลงเหลือแก๊สอะเซทิลีนอยู่จำนวนหนึ่ง จึงเหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะงานที่ต้องการเติมปริมาณธาตุคาร์บอนที่บริเวณผิวของโลหะ เปลวไฟเชื่อมชนิดนี้เหมาะกับการเชื่อมโลหะที่ไม่ใช่จำพวกเหล็ก (Non-ferrous) ที่ต้องการใช้อุณหภูมิหลอมละลายไม่สูงมากนัก เช่น การเชื่อมโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม การเชื่อมโลหะแมกนีเซียมและแมกนีเซียมผสม รวมถึงงานประเภทการบัดกรีแข็ง (Brazing) การเชื่อมด้วยเปลวไฟชนิดนี้ไม่ควรปฏิบัติงานในที่อับอากาศ เพราะปริมาณของแก๊สอะเซทิลีนที่หลงเหลือจะก่อให้เกิดอันตราย เกิดการลุกไหม้ขึ้นในที่อากาศอับ ลักษณะของเปลวไฟชนิดนี้มีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก)

2. เปลวกลาง หรือเปลวนิวทรัล (Neutral flame) เป็นเปลวแบบสมดุลของปริมาณคาร์บอนกับ (C) ออกซิเจน (O) เป็นเปลวไฟที่ได้จากสัดส่วนผสมของปริมาณแก๊สอะเซทิลีนกับแก๊สออกซิเจนเท่ากันที่ปริมาณ 1 : 1 การเผาไหม้สมบูรณ์จะประกอบด้วยเปลวไฟ 2 ชั้น ชั้นในเป็นกรวยเปลวมน ระยะห่างจากปลายกรวยประมาณ 3 มม. จะมีอุณหภูมิประมาณ $3,150^\circ C$ เมื่อนำไปเผาโลหะที่เป็นเหล็กจะหลอมละลายเป็นบ่อหลอมคล้ายน้ำเชื่อม เมื่อเย็นตัวลงจะได้แนวเชื่อมที่มีความสะอาด และมีความแข็งแรง เปลวไฟชนิดนี้เหมาะสำหรับการใช้ในการเชื่อมและการตัดโลหะได้ดี ลักษณะของเปลวไฟชนิดนี้มีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ข)

3. เปลวเพิ่ม หรือเปลวออกซิไดซิง (Oxidizing flame) เป็นเปลวที่มีปริมาณของออกซิเจนมาก เปลวไฟที่ได้จากสัดส่วนผสมของปริมาณแก๊สอะเซทิลีนน้อยกว่าแก๊สออกซิเจน ลักษณะของเปลวไฟจะมี 2 ชั้น เปลวชั้นในเป็นเปลวรูปกรวยแหลมทัดสั้น ส่วนกรวยเปลวชั้นนอกจะมีสีเขียวอมน้ำเงิน เปลวนี้มีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ $3,480^\circ C$ เมื่อทำการเชื่อมจะเกิดประกายไฟหรือสะเก็ดไฟกระเด็นออกมาจากบ่อหลอมละลายค่อนข้างมาก บ่อหลอมละลายมีฟองอากาศไม่เหมาะที่จะนำไปใช้กับงานเชื่อมโลหะเหล็ก เพราะการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะมีออกซิเจนหลงเหลืออยู่ และออกซิเจนก็จะเติมลงในเนื้อเหล็ก ทำให้แนวเชื่อมเปราะ ความแข็งต่ำ แต่นิยมนำไปใช้ในการตัดโลหะแผ่นบาง ลักษณะของเปลวไฟดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ค)



รูปที่ 4.11 ชนิดเปลวไฟของการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (OAW)

ที่มา : Rafael Lucas, *Welding Research-Welding Journal*, 2021

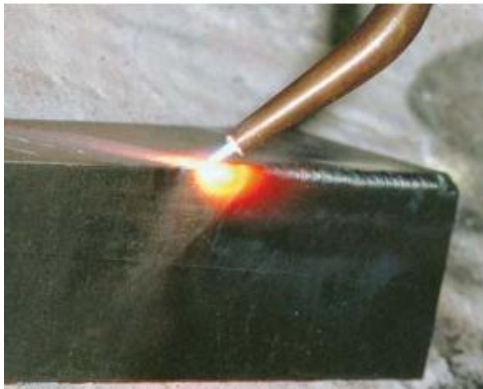
ข. เทคนิคการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน

การเชื่อมออกซิอะเซทิลีนนี้สามารถทำการเชื่อมได้ทั้งแบบวิธีการเติมลวด (Filler metal welding) และแบบวิธีที่ไม่ต้องเติมลวด (Autogenous welding) ซึ่งแบบแรกจะได้แนวเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูงกว่าแบบหลัง โดยการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะของงาน ดังแสดงลักษณะของการเชื่อมที่แตกต่างกันของทั้งสองแบบในรูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) นอกจากนี้ ยังมีเทคนิคการเดินของหัวเชื่อมโดยขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน ซึ่งมีเทคนิคการเชื่อมอยู่ 2 แบบ คือ

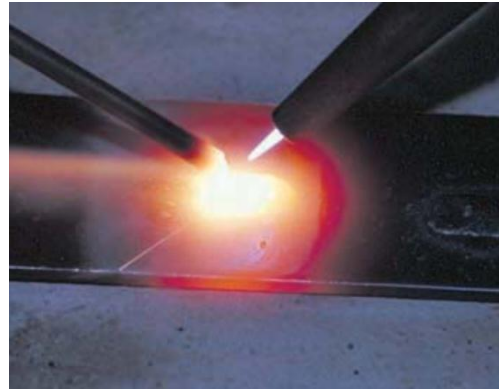
- เทคนิคการเชื่อมแบบเดินหัวเชื่อมไปทางซ้ายมือ (Leftward technique) หรือเรียกอีกอย่างว่า Fore hand welding เป็นเทคนิคการเชื่อมที่ให้ลวดเชื่อมนำหน้าเปลวไฟเชื่อม โดยช่างเชื่อมจะถือหัวเชื่อมด้วยมือขวา แล้วเริ่มเชื่อมจากทางขวามือไปทางซ้ายมือ วิธีการเชื่อมแบบนี้จะสูญเสียความร้อนไปบางส่วนเนื่องจากมีความร้อนสะท้อนออกไปจากผิวหน้าของโลหะงาน ซึ่งช่างเชื่อมสามารถที่จะเพิ่มหรือลดปริมาณของความร้อนที่บ่อหลอมละลายได้โดยการปรับมุมของหัวทิฟเชื่อมกับชิ้นงาน กล่าวคือ ถ้าต้องการลดปริมาณความร้อนให้ลดมุมหัวทิฟเชื่อมลง (ทำมุมน้อยลง) ในทางกลับกันถ้าต้องการเพิ่มปริมาณความร้อนก็ให้เพิ่มมุมหัวทิฟเชื่อมขึ้น (ทำมุมมากขึ้น) ดังนั้น วิธีการเชื่อมแบบนี้จึงเหมาะสำหรับ

การเชื่อมชิ้นงานโลหะที่หนาไม่เกิน 3 มิลลิเมตร หรือถ้าต้องเชื่อมชิ้นงานที่หนามากเกินต้องทำการบากหน้างาน โดยมุมของลวดเชื่อมและมุมหัวเชื่อมจะต้องควบคุมให้อยู่ระหว่าง $30-40^{\circ}$ และ $60-70^{\circ}$ ตามลำดับ ดังแสดงลักษณะรูปแบบของการเชื่อมในรูปที่ 4.13 (ก)

● เทคนิคการเชื่อมแบบเดินหัวเชื่อมไปทางขวามือ (Rightward technique) หรือเรียกอีกอย่างว่า Back hand welding เป็นเทคนิคการเชื่อมที่ให้ลวดเชื่อมตามหลังเปลวไฟเชื่อม โดยช่างเชื่อมจะถือหัวเชื่อมด้วยมือขวา แล้วเริ่มเชื่อมจากทางซ้ายมือไปทางขวามือ โดยควบคุมให้เปลวไฟพุ่งไปในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของการเชื่อม วิธีการเชื่อมแบบนี้บ่อหลอมละลายจะไม่สูญเสียความร้อน จึงเหมาะสำหรับการเชื่อมชิ้นงานโลหะที่หนาเกิน 3 มิลลิเมตร ขึ้นไป โดยมุมของลวดเชื่อมและมุมหัวเชื่อมจะต้องควบคุมให้อยู่ระหว่าง $40-50^{\circ}$ และ $40-50^{\circ}$ ตามลำดับ ดังแสดงลักษณะรูปแบบของการเชื่อมในรูปที่ 4.13 (ข)



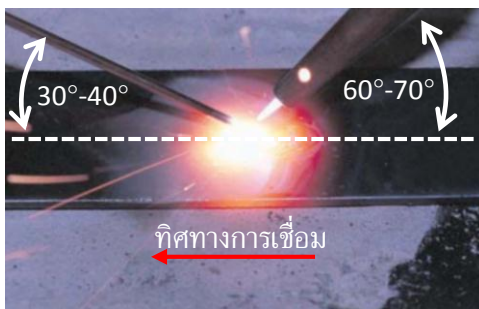
(ก) เชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม



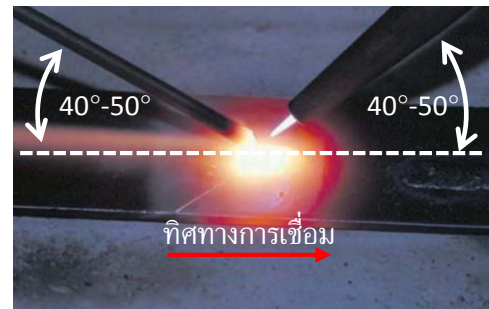
(ข) เชื่อมแบบเติมลวดเชื่อม

รูปที่ 4.12 การเชื่อมแบบไม่เติมลวดกับแบบเติมลวดของการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (OAW)

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metal Fabrication*, 2012



(ก)



(ข)

เชื่อมไปทางซ้ายมือ (Leftward technique) เชื่อมไปทางขวามือ (Rightward technique)

รูปที่ 4.13 เทคนิคการเดินหัวเชื่อมของการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (OAW)

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metal Fabrication*, 2012

ค. องค์ประกอบที่สำคัญในการเชื่อมออกซิอะเซทิลิน

Larry Jeffus (2012) ได้กล่าวไว้ในการเชื่อมด้วยแก๊สออกซิอะเซทิลิน ให้ได้แนวเชื่อมที่มีคุณภาพตามที่ต้องการนั้นต้องควบคุมองค์ประกอบ 4 ประการหลักที่สำคัญให้ถูกต้องและเหมาะสม องค์ประกอบดังกล่าว ได้แก่

1. ปริมาณความร้อนที่ถูกต้อง : ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานและขนาดของหัวทิพเชื่อมที่ใช้ ถ้าชิ้นงานบางต้องใช้หัวทิพที่มีขนาดเล็ก แต่ถ้างานหนาต้องใช้หัวทิพที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ความร้อนที่ใช้ต้องไม่มากหรือน้อยเกินไป กล่าวคือ ถ้าน้อยเกินไปจะเกิดปัญหาโลหะงานไม่หลอมละลาย แต่ถ้ามากเกินไปควบคุมการหลอมละลายยากบ่อหลอมละลายอาจทะลุชิ้นงานเชื่อมได้

2. ระยะห่างของกรวยเปลวไฟ : กรวยของเปลวไฟควรมีระยะห่างอยู่ระหว่าง 2–3 มิลลิเมตร กับผิวชิ้นงาน โดยต้องระวังไม่ให้กรวยเปลวไฟขึ้นในสัมผัสกับผิวชิ้นงานเพราะจะทำให้ความร้อนลดลง สร้างบ่อหลอมละลายได้ยากและเกิดแก๊สต่าง ๆ เข้าไปรวมตัวกับน้ำโลหะในบ่อหลอมละลายได้ง่าย ความร้อนสูงสุดของเปลวไฟจะอยู่ที่ปลายของกรวยเปลวไฟและลดลงเรื่อย ๆ ถ้าระยะห่างของกรวยเปลวไฟมากขึ้น หรือชิดมากขึ้น

3. มุมหัวทิพเชื่อมและมุมลวดเชื่อม : มุมของหัวทิพเชื่อมและมุมลวดเชื่อมจะต้องมีความสัมพันธ์กับชนิดของรอยต่อและตำแหน่งในการเชื่อม โดยจะเปลี่ยนไปเรื่อย ๆ ตามความเหมาะสมกับลักษณะของตำแหน่งทำเชื่อม

4. ความเร็วและการเดินแนวเชื่อม : ทั้งความเร็วและการเดินแนวหรือการส่ายหัวทิพเชื่อมมีความสัมพันธ์กันกับความหนาของโลหะชิ้นงาน ชนิดรอยต่อ และตำแหน่งทำเชื่อม ซึ่งมีผลโดยตรงกับขนาดของแนวเชื่อม เช่น ต้องการแนวเชื่อมที่เล็กแคบแต่นูน หรือแนวเชื่อมกว้างแต่แบนราบ สามารถควบคุมได้โดยการเดินส่ายหัวทิพเชื่อมในแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งอีกนัยหนึ่งเป็นการควบคุมความเร็วในการเชื่อม

ง. ลวดเชื่อมออกซิอะเซทิลิน (Filler rod)

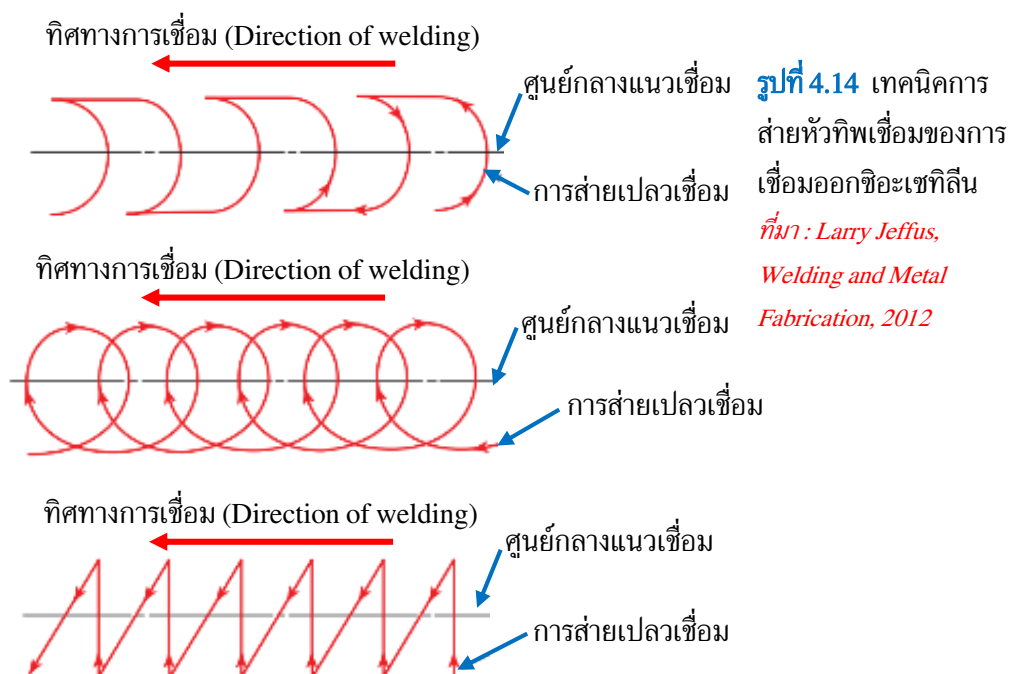
การเชื่อมด้วยแก๊สออกซิอะเซทิลินแบบเติมลวด ส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมโลหะที่มีความหนาแล้วทำการต่อชน (Butt joint) หรือต่อตัวที (T joint) ข้างเชื่อมจะต้องเลือกลวดเชื่อมที่เป็นโลหะชนิดเดียวกับโลหะงาน โดยทั่วไปเป็นที่ทราบกันว่าลวดเชื่อมที่นิยมใช้กัน แบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1. ลวดเชื่อมประเภทที่เป็นโลหะเหล็ก (Ferrous metal rod) จะมีส่วนผสมของธาตุเหล็กเป็นหลักและจะเติมธาตุอื่น ๆ ผสมตามคุณสมบัติที่ต้องการ เช่น ธาตุคาร์บอน แมงกานีส ซิลิกอน และฟอสฟอรัส เป็นต้น

2. ลวดเชื่อมประเภทที่เป็นโลหะไม่ใช่เหล็ก (Non-ferrous metal rod) จะใช้สำหรับการเชื่อมโลหะจำพวก อลูมิเนียม ทองแดง ทองเหลือง เป็นต้น โดยลวดเชื่อมจะต้องเป็นโลหะชนิดเดียวกันกับโลหะงานที่เชื่อม (Base metal) ขณะที่เชื่อมจำเป็นต้องใช้ฟลักซ์ (Flux) ร่วมด้วยเพื่อช่วยในการเพิ่ม

ประสิทธิภาพในการประสานเนื้อโลหะได้ดี

การเลือกใช้ลวดเชื่อมต้องพิจารณาว่าร่วมกันกับขนาดของหัวทิฟเชื่อม ความดันแก๊ส และขนาดของลวดเชื่อม ดังแสดงความสัมพันธ์ใน **ตารางที่ 4.4** ซึ่งอ้างอิงตามผู้ผลิต MWC (2014)



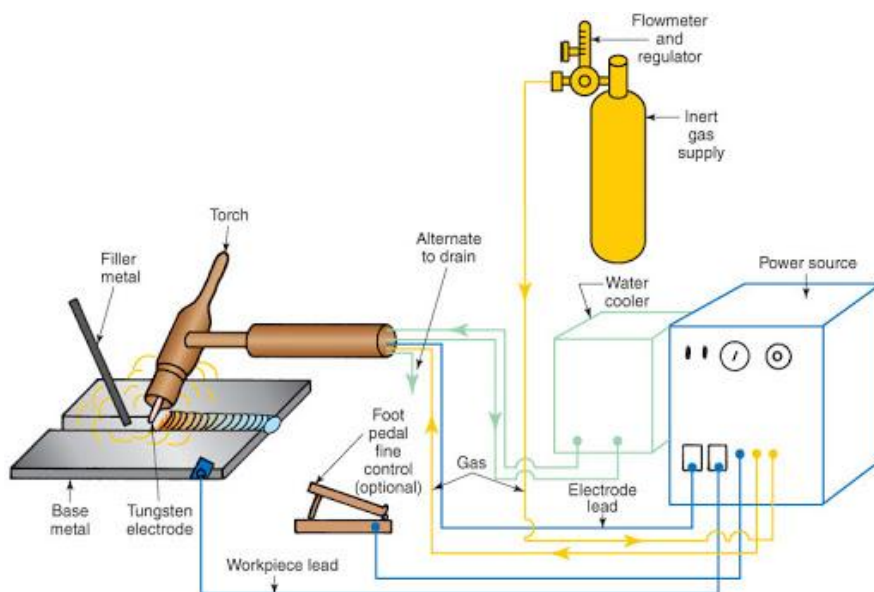
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของความดันแก๊ส ชี้นงานโลหะและขนาดลวดเชื่อม

ที่มา : MWC : Maine Welding Company 2014

| ความดันแก๊ส ปอนด์/ตารางนิ้ว | | ความหนาของโลหะงาน | | ขนาด Ø ของลวดเชื่อม | |
|-----------------------------|-----------|-------------------|-----------|---------------------|-----------|
| ออกซิเจน | อะเซทิลีน | นิ้ว | มิลลิเมตร | นิ้ว | มิลลิเมตร |
| 1 | 1 | — | — | — | — |
| 2 | 2 | 1/32 | 0.8 | 1/16 | 1.5 |
| 3 | 3 | 1/16 | 1.5 | 1/16 | 1.5 |
| 4 | 4 | 3/32 | 2.4 | 1/16–1/8 | 1.5–3.2 |
| 5 | 5 | 1/8 | 3.2 | 3/32–1/8 | 2.4–3.2 |
| 6 | 6 | 3/16 | 4.8 | 1/8 | 3.2 |
| 7 | 7 | 1/4 | 6.4 | 3/16 | 4.8 |
| 8 | 8 | 5/16 | 7.9 | 3/16 | 4.8 |
| 9 | 9 | 3/8 | 9.5 | 1/4 | 4.8 |
| 10 | 10 | 7/9 | 11.5 | 3/16–1/4 | 4.8–6.4 |

4.2 การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสปีคคูลัม (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW)

อ้างอิงตาม CK Worldwide (2017) ที่ได้กล่าวไว้ว่า เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่พัฒนาต่อยอดมาจากการเชื่อมแก๊สออกซิเจนอะเซทิลีน (Oxyacetylene Welding : OAW) โดยต่างกันที่ใช้ความร้อนจากการอาร์กของลวดทั้งสแตน (Tungsten electrode) แทนเปลวแก๊สออกซิเจนอะเซทิลีนและมีแก๊สเฉื่อยช่วยปกคลุมบ่อหลอมละลาย จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า การเชื่อมทิก (TIG) ซึ่งย่อมาจาก “Tungsten Inert Gas” และในแถบยุโรปบางประเทศยังมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า WIG ซึ่งย่อมาจาก “Wolfram Inert Gas” ในยุคแรก ๆ จะใช้แก๊สฮีเลียม (Helium gas) เป็นแก๊สปกคลุมจึงมีชื่อเรียกตามชนิดแก๊สปกคลุมว่า Heliarc (Helium Arc) หรือ Heliweld (Helium Welding) โดยชื่อที่ใช้เรียกเป็นมาตรฐานสากล คือ (Gas Tungsten Arc Welding) ที่ย่อว่า GTAW ดังแสดงถึงอุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสปีคคูลัม ในรูปที่ 4.15



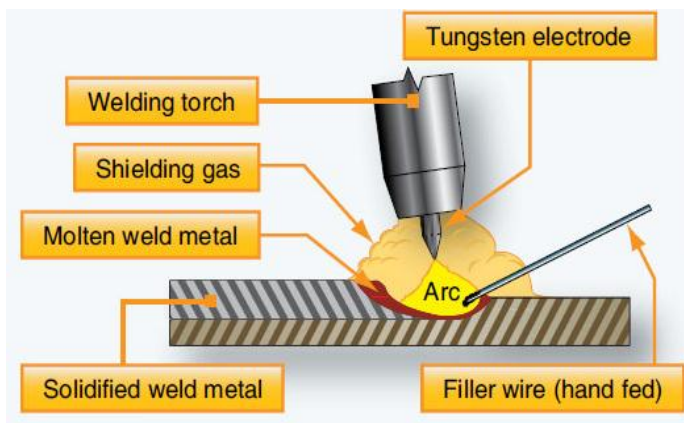
รูปที่ 4.15 อุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสปีคคูลัม (GTAW)

ที่มา : Halverson CTS, The Gas Tungsten Arc Welding Station, 2017

4.2.1 ระบบการอาร์กและกระแสไฟเชื่อม (Arc system and welding current)

ระบบการอาร์ก (Arc system) Miller Electric Mfg. (2018) ได้อธิบายไว้ในคู่มือของการเชื่อมไว้ว่า กรรมวิธีการเชื่อมทิก (TIG) เป็นการเชื่อมที่จัดอยู่ในประเภทหลอมละลายที่อาศัยความร้อนจากการอาร์ก ระหว่างลวดทั้งสแตนกับชิ้นงานโลหะเพื่อสร้างบ่อหลอมละลาย ซึ่งขณะเดียวกันที่บริเวณเกิดการอาร์กจะใช้แก๊สเฉื่อย (Inert gas) ปกคลุมบริเวณอาร์กนั้นเพื่อป้องกันอากาศภายนอกเข้ามาทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะในบ่อหลอมละลาย เช่น แก๊สออกซิเจน ไนโตรเจน หรือความชื้นในอากาศ เกิดเป็น

ปฏิกิริยาที่เรียกว่า ออกซิเดชัน (Oxidation) ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการอาร์กสูงมากเพียงพอสำหรับการหลอมละลายโลหะงาน โดยลวดทั้งสแตนไม่หลอมละลาย (Non-Consumable Electrode) จะทำหน้าที่เป็นเพียงตัวผลิตพลังงานความร้อน ดังแสดงลักษณะองค์ประกอบของการอาร์กในรูปที่ 4.16 ซึ่งเมื่อความร้อนมากพอที่จะสร้างเป็นบ่อหลอมละลายที่จูดรอยต่อตำแหน่งที่ต้องการ รอยต่อตำแหน่งนั้นจะเกิดการทำให้เนื้อโลหะติดกันอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.16 หลักการของ
เชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊ส
ปกคลุม (GTAW)
*ที่มา : Flight Mechanic,
Aircraft Welding, 2015*

ในทางปฏิบัติได้จำแนกเทคนิคการเชื่อมให้ติดกันของการเชื่อมทิกไว้ 3 แบบ คือ

- เทคนิคการเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenous welding technique) เป็นการเชื่อมที่ใช้เนื้อโลหะงานของบ่อหลอมละลายผสมติดกันโดยปราศจากการเติมเนื้อโลหะจากภายนอกเข้าไป ส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมงานโลหะที่บาง ผิวแนวเชื่อมราบ ไม่นูน เน้นความสวยงามไม่เน้นความแข็งแรงของแนวเชื่อม ดังแสดงรูปแบบของการเชื่อมในรูปที่ 4.17 (ก)
- เทคนิคการเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมชนิดเดียวกับโลหะงาน (Homogenous welding technique) เป็นเทคนิคการเชื่อมที่ต้องใช้โลหะจากภายนอกเติมเข้าไปร่วมกับบ่อหลอมละลาย ด้วยลวดเชื่อม (Filler material) โดยลวดเชื่อมเติมเป็นโลหะชนิดเดียวกันกับโลหะงาน เหมาะกับงานเชื่อมโลหะหนาที่ต้องการความแข็งแรง แนวเชื่อมนูนและมีส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมเหมือนกันกับโลหะงานที่เชื่อม (Base metals) ดังแสดงรูปแบบของการเชื่อมในรูปที่ 4.17 (ข)
- เทคนิคการเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมต่างชนิดกับโลหะงาน (Heterogenous welding technique) เป็นการเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ใช้ลวดเชื่อมต่างชนิดกับโลหะงานที่เชื่อม เจตนาที่จะสร้างแนวเชื่อมที่มีสมบัติบางอย่างที่ต้องการ เช่น ต้องการควบคุมส่วนทางเคมีของแนวเชื่อม หรือสมบัติทางกลหรือประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อ เป็นต้น ซึ่งพบมากในการเชื่อมโลหะงานต่างชนิด (Dissimilar welding) ดังแสดงรูปแบบของการเชื่อมในรูปที่ 4.17 (ค)

ระบบกระแสไฟเชื่อม (System of welding current) ขบวนการเชื่อมที่เลือกใช้กระแสไฟเชื่อมได้ 3 ชนิด ที่เกิดจากแหล่งพลังงานของเครื่องเชื่อมตามข้อมูลของ Larry Jeffus (2012) ดังนี้

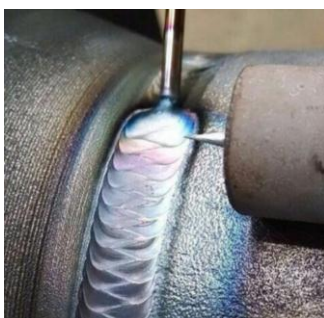
1. กระแสไฟเชื่อมชนิดกระแสตรงขั้วลบ (Direct Current Electrode Negative) DCEN
2. กระแสไฟเชื่อมชนิดกระแสตรงขั้วบวก (Direct Current Electrode Positive) DCEP
3. กระแสไฟเชื่อมชนิดกระแสสลับความถี่สูง (Alternating Current and High Frequency) ACHF

โดยแต่ละชนิดของระบบกระแสไฟเชื่อมจะมีความโดดเด่นแตกต่างกัน ดังสรุปเปรียบเทียบไว้ของแต่ละชนิดของกระแสไฟในรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.5 สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับกระแสไฟเชื่อมของแต่ละชนิดที่เลือกใช้กล่าวไว้ในบทเรียนถัดไปจากบทเรียนนี้



(ก)

แบบไม่เติมลวดเชื่อม



(ข)

แบบเติมลวดเชื่อมชนิดเดียวกัน



(ค)

แบบเติมลวดเชื่อมต่างชนิด

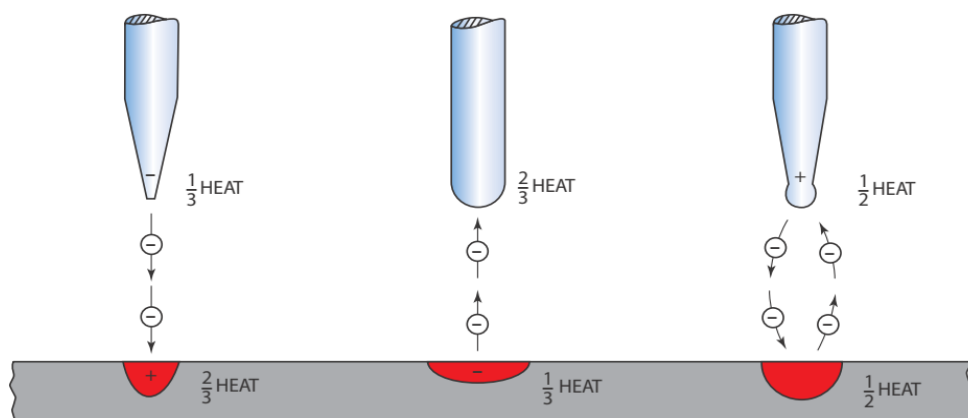
รูปที่ 4.17 จำแนกเทคนิคการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสปีคคูลัม (TIG)

ที่มา : West Country Welding Supplies, 2013

กระแสตรงขั้วลบ : DCEN

กระแสตรงขั้วบวก : DCEP

กระแสสลับความถี่สูง : AC



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบชนิดของกระแสไฟเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสปีคคูลัม (TIG)

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication 2012

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบชนิดกระแสไฟเชื่อมสำหรับขบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสตีล

ที่มา : B. J. Moniz and R. T. Miller, *Welding Skills* 2004

| ชนิดของกระแสไฟเชื่อม (Type of welding current) | | |
|--|---|--|
| กระแสตรง : DCEN, DC- | กระแสตรง : DCEP, DC+ | กระแสสลับ : ACHF |
| <ul style="list-style-type: none"> • ลวดทั้งสแตนเป็นขั้วลบ • ไม่ขจัดออกไซด์ระหว่างอาร์ก • ความร้อนที่ขึ้นงาน 70 % ความร้อนที่ทั้งสแตน 30 % • บ่อหลอมละลายซึมลึกมาก • แนวเชื่อมแคบ | <ul style="list-style-type: none"> • ลวดทั้งสแตนเป็นขั้วบวก • ขจัดออกไซด์ระหว่างอาร์ก • ความร้อนที่ขึ้นงาน 30 % ความร้อนที่ทั้งสแตน 70 % • บ่อหลอมละลายซึมลึกน้อย • แนวเชื่อมกว้าง | <ul style="list-style-type: none"> • ลวดทั้งสแตนเป็นขั้วบวกและลบ • ขจัดออกไซด์ระหว่างอาร์กที่ ทุก ๆ ครั้งไซเคิล • ความร้อนที่ขึ้นงาน 50 % ความร้อนที่ทั้งสแตน 50 % • บ่อหลอมซึมลึกปานกลาง • แนวเชื่อมกว้างปานกลาง |

4.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การเชื่อม (Welding equipment)

ขบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสตีล หรือการเชื่อมทิก (TIG) ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญโดยอ้างอิงตาม GSI SLV. IWE (2015) ดังต่อไปนี้

1. เครื่องเชื่อม (Welding machine)

เครื่องเชื่อมสำหรับการเชื่อมทิก เป็นเครื่องเชื่อมที่มีการออกแบบให้มีระบบความถี่สูง (High frequency) และมีสวิตช์อัตโนมัติ (Solenoid valve) สำหรับการควบคุมการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น เพราะขบวนการเชื่อมนี้บริเวณอาร์กให้ความร้อนสูงมาก โดยทั่วไปมี 3 แบบ ดังนี้

- แบบทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Transformer) เป็นเครื่องเชื่อมที่ป้อนจ่ายไฟเชื่อมกระแสสลับ (AC)
- แบบทรานส์ฟอร์มเมอร์-เรกติไฟเออร์ (Transformer-rectifiers) เป็นเครื่องเชื่อมที่ป้อนจ่ายไฟเชื่อมกระแสตรง (DC)
- แบบเจนเนอเรเตอร์ (Generators) ขับด้วยกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถป้อนจ่ายได้เฉพาะไฟกระแสตรง หรือที่ขับด้วยกำลังเครื่องยนต์ สามารถจ่ายได้ทั้งไฟกระแสตรงและกระแสสลับ โดยปกตินิยมใช้ในพื้นที่ปฏิบัติงานที่ไม่มีระบบกระแสไฟฟ้ารองรับ

จากที่ได้กล่าวมาทั้ง 3 แบบข้างต้น ข้างเชื่อมสามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสมโดยพิจารณาจากความสามารถของเครื่องเชื่อม ความสะดวกในการใช้งานรวมถึงข้อจำกัดบางอย่างในการใช้งาน และต้นทุน โดยปกตินิยมใช้งานแบบทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Transformer) กับแบบทรานส์ฟอร์มเมอร์-เรกติไฟเออร์ (Transformer-rectifiers) เพราะมีข้อดีหลายประการ เช่น ราคาต้นทุนต่ำ เสียงเครื่องทำงานเงียบ การบำรุงรักษาง่ายและสะดวก ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องเชื่อมทิกพร้อมอุปกรณ์ ในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 เครื่องเชื่อม
พร้อมอุปกรณ์สำหรับ
การเชื่อมอาร์กทั้งสแตน
เลส (TIG)

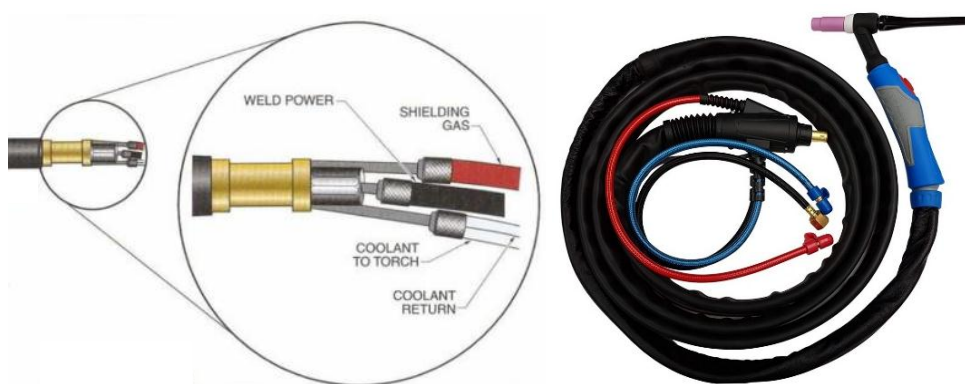
ที่มา : Miller Electric
Mfg., Welding
Equipment, 2018

2. หัวเชื่อมพร้อมอุปกรณ์ (Welding torches)

หัวเชื่อมทิก หรือช่างเชื่อมที่นิยมเรียกกันว่า “ทิกทอร์ช (TIG Torch)” เป็นอุปกรณ์หลักที่สำคัญ เป็นส่วนที่ต้องสัมผัสกับอยู่กับความร้อนจากการอาร์อยู่ตลอดเวลาขณะเชื่อม ประจวบเหมาะกับความร้อนของขบวนการเชื่อมทิกที่ค่อนข้างสูง จึงต้องมีการออกแบบหัวเชื่อมให้มีระบบระบายความร้อน (Cooling system) เพื่อช่วยลดความเสียหายของหัวเชื่อมที่เกิดจากความร้อน จึงได้ออกแบบหัวเชื่อมตามระบบระบายความร้อนได้ 2 แบบ คือ

1. หัวเชื่อมที่มีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water-cooled torches) ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (ก) จะใช้กับการเชื่อมที่ต้องการกระแสไฟเชื่อมที่สูงเกิน 160 แอมแปร์ ซึ่งเกิดความร้อนสูงมาก น้ำสามารถช่วยระบายความร้อนได้ดีกว่าอากาศ จึงสามารถเชื่อมได้อย่างต่อเนื่อง และช่วยลดอัตราการสึกหรอของลวดทั้งสแตนเลส ที่สำคัญช่วยลดความร้อนที่มือจับของช่างเชื่อม แต่ก็มีข้อเสียที่บำรุงรักษายากอาจเกิดการรั่วของระบบน้ำรวมถึงไม่สะดวกในการเคลื่อนย้ายไปปฏิบัติงานในที่ต่าง ๆ

2. หัวเชื่อมที่มีระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air-cooled torches) ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (ข) จะใช้กับการเชื่อมที่ต้องการกระแสไฟเชื่อมสูงไม่เกิน 150 แอมแปร์ เป็นที่นิยมใช้กันมากด้วยเพราะมีน้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายสะดวก ดูแลรักษาง่าย ระบบไม่ซับซ้อน สามารถออกแบบหัวเชื่อมได้หลากหลายขนาด โดยเฉพาะหัวเชื่อมที่ต้องการใช้กับกระแสเชื่อมที่ต่ำ



(ก) หัวเชื่อมแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water-cooled torches)



(ข) หัวเชื่อมแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air-cooled torches)

รูปที่ 4.20 หัวเชื่อมทิกที่มีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำและด้วยอากาศ

ที่มา : B. J. Moniz and R. T. Miller, *Welding Skills 2004* และ *Miller Electric, Equipment, 2018*

ส่วนประกอบของหัวเชื่อมทิก (Components of TIG torch)

หัวเชื่อมทิกมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 โดยแต่ละส่วนประกอบมีหน้าที่ดังต่อไปนี้ อ้างอิงตาม CK Worldwide (2017)

1. ตัวหัวเชื่อม (Torch body) เป็นส่วนลำตัวของหัวเชื่อมสำหรับจับถือของช่างเชื่อม และทำหน้าที่เป็นทางเดินของแก๊สปกคลุม กระแสไฟเชื่อม และระบบระบายความร้อน (น้ำ/อากาศ)
2. ฝาครอบ (Back cap) เป็นส่วนปลายด้านหลังของหัวเชื่อมมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้แก๊สภายในไหลออกมา และยังเป็นตัวช่วยป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกไหลเข้าไปภายใน ฝาครอบมีทั้งแบบฝาครอบสั้น (Short back cap) และแบบฝาครอบยาว (Long back cap)

3. ลวดทังสเตน (Tungsten electrode) ทำหน้าที่สำหรับการอาร์กและนำความร้อนไปยังชิ้นงานเพื่อทำการหลอมละลาย โดยลวดทังสเตนไม่หลอมละลาย (Non-Consumable Electrode)

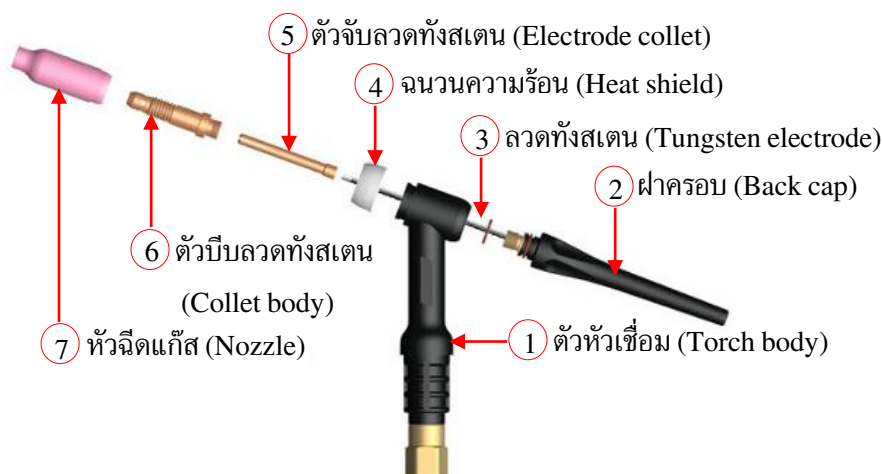
4. ฉนวนกันความร้อน (Heat shield) เป็นส่วนที่มีลักษณะเป็นวงแหวน (O-ring) ทำหน้าที่ป้องกันความร้อนจากการอาร์กไม่ให้ถ่ายโอนไปยังตัวหัวเชื่อม

5. ตัวจับลวดทังสเตน (Electrode collet) เป็นตัวจับลวดทังสเตน ซึ่งมีขนาดรูภายในตามของ Ø ของแท่งลวดทังสเตน ซึ่งส่วนใหญ่ทำจากโลหะทองแดงผสมเพื่อต้องการคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและนำความร้อนที่ดี

6. ตัวบีบแท่งลวดทังสเตน (Collet body) เป็นชิ้นส่วนทำหน้าที่บีบลวดทังสเตนให้ยึดแน่นกับตัวจับลวด (Electrode collet) โดยปลายด้านหนึ่งยึดติดกับหัวเชื่อมด้วยเกลียว ตรงกลางมีรูเพื่อให้แก๊สสปกคลุมไหลออกไปยังหัวฉีดแก๊ส แล้วไปปกคลุมบ่อหลอมละลาย มักทำด้วยโลหะทองแดงผสม

7. หัวฉีดแก๊ส (Nozzle) เป็นส่วนปลายที่อยู่ใกล้กับบ่อหลอมละลาย ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลหรือฉีดแก๊สสปกคลุมไปยังบ่อหลอมละลาย มีหลายรูปแบบและหลายขนาด ผลิตจากวัสดุจำพวกที่ทนความร้อนสูง ได้แก่ เซรามิกส์ แก้ว หรือ ซิลิกอนออกไซด์ เป็นต้น หัวฉีดแก๊สที่ใช้กับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า

หัวเชื่อมทิกได้มีการออกแบบไว้หลากหลายลักษณะ โดยมุ่งเน้นให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในลักษณะต่าง ๆ เช่น ในที่แคบหรือตำแหน่งงานที่เชื่อมยาก หรือบางแบบสามารถหมุนปรับเอียงได้เพื่อรองรับกับลักษณะงานรวมไปถึงการออกแบบรองรับกับหัวฉีดแก๊สที่เป็นแบบสั้นและแบบยาว เป็นต้น ดังตัวอย่างหัวเชื่อมที่ออกแบบไว้หลากหลายเฉพาะงานในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.21 ส่วนประกอบของหัวเชื่อมทิก

ที่มา : CK World Wide, The Standard in TIG Welding, 2017



รูปที่ 4.22 ลักษณะรูปแบบที่หลากหลายของการออกแบบหัวเชื่อมทิก

ที่มา : CK World Wide, The Standard in TIG Welding, 2017

3 ลวดทังสเตนสำหรับอาร์กเชื่อม (Tungsten electrode)

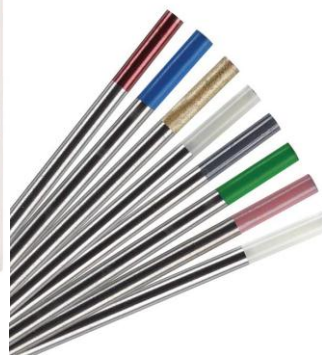
ลวดทังสเตนหรือแท่งทังสเตนสำหรับขบวนการเชื่อมทิกจะทำหน้าที่เป็นตัวอาร์กกับชิ้นงานเพื่อสร้างบ่อหลอมละลายโดยตัวของลวดเองจะไม่หลอมละลาย เหตุเพราะโลหะทังสเตนมีจุดหลอมเหลวสูงมากถึง $3,410^{\circ}\text{C}$ จะมีเพียงการสีกหรือไปตามสภาพของการใช้งานเท่านั้น ตามมาตรฐานของสมาคมการเชื่อมแห่งสหรัฐอเมริกา American Welding Society: AWS (2017) ได้จำแนกชนิดของลวดทังสเตนตามส่วนผสมของธาตุในโลหะทังสเตนดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 โดยแต่ละชนิดจะแยกด้วยรหัสสีที่ปลายของแท่งลวดทังสเตนดังแสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งช่างเชื่อมต้องเลือกลวดทังสเตนที่ถูกต้องเหมาะสมกับชนิดของกระแสไฟเชื่อม (Welding current) โดยปกติขนาดของลวดทังสเตนโตขึ้นจะสามารถเชื่อมได้ในกระแสไฟที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเหมือนกันทั้งระบบกระแสไฟ DCEN กระแสไฟ DCEP และกระแสไฟ AC ดังแสดงเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของขนาดลวดทังสเตนกับชนิดของกระแสไฟเชื่อมในตารางที่ 4.7

การกำหนดรหัสของสีต่าง ๆ มีเจตนาต้องการป้องกันความผิดพลาดในการเลือกใช้ เพราะแต่ละรหัสสีจะออกแบบส่วนผสมทางเคมีของลวดทังสเตนมาเพื่อความโดดเด่นในการใช้งาน เช่น หัวสีแดง (EWTh-2) เหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิม หรือหัวสีเขียว (EWP) เหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะอลูมิเนียม ส่วนหัวสีส้ม (EWCe-2) จุดเด่นใช้สำหรับการเชื่อมโลหะแผ่นบาง เป็นต้น

ตารางที่ 4.6 ชนิดของลวดทังสเตน (Type of tungsten electrode)

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metal Fabrication 2011*

| ชนิดของลวดทังสเตน (AWS) | ส่วนผสมของลวดทังสเตน (Composition) | สีของลวดทังสเตน (Tip color) |
|-------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| EWP | Pure tungsten | สีเขียว |
| EWTh-1 | 1% Thorium added | สีเหลือง |
| EWTh-2 | 2% Thorium added | สีแดง |
| EWZr | 1/4 to 1/2 Zirconium added | สีน้ำตาล |
| EWCe-2 | 2% Cerium added | สีส้ม |
| EWLa-1 | 1% Lanthanum added | สีดำ |
| EWG | Alloy not specified | ไม่ระบุ |



รูปที่ 4.23 ลักษณะ

รูปแบบการแบ่งชนิดลวดทังสเตนด้วยรหัสสี

ที่มา : *The Publications of the welder, Tungsten Electrode 2017*

ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของขนาดลวดทังสเตนกับชนิดของกระแสไฟเชื่อม

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metal Fabrication 2011*

| ขนาด Ø ของลวดทังสเตน | | กระแสไฟเชื่อม (A) | | |
|----------------------|----------------|-------------------|-------|---------|
| นิ้ว (in) | มิลลิเมตร (mm) | DCEN | DCEP | AC |
| 0.04 | 1 | 15–16 | – | 10–50 |
| 1/16 | 2 | 70–100 | 10–20 | 50–90 |
| 3/32 | 2.4 | 90–200 | 15–30 | 80–130 |
| 1/8 | 3 | 150–350 | 25–40 | 100–200 |
| 5/32 | 4 | 300–450 | 40–55 | 160–300 |

การลับลวดทังสเตน (Grinding tungsten electrode)

นอกจากการเลือกชนิดของลวดทังสเตนที่ต้องสัมพันธ์กับชนิดของโลหะงาน ชนิดของกระแสไฟเชื่อม และปริมาณกระแสไฟที่ต้องใช้แล้วนั้น การลับลวดทังสเตนที่ถูกต้องก็มีความจำเป็นไม่น้อยไปกว่ากัน ในทางปฏิบัติช่างเชื่อมสามารถทำการลับลวดทังสเตนได้ทั้งแบบใช้เครื่องมือลับลวดทังสเตน (Tungsten grinder) นิยมเลือกใช้กันมากเพราะมีความเที่ยงตรงสูง ซึ่งมีทั้งแบบชนิดพกพา (Portable) สำหรับงานภาคสนามนอกสถานที่และแบบชนิดติดตั้งประจำตำแหน่ง (Stationary) ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (ก) และ (ข) ตามลำดับ สำหรับกรณีที่ลับด้วยมือกับล้อหินขัด ช่างเชื่อมต้องมีความชำนาญมากพอ เพราะต้องควบคุมด้วยทักษะของผู้ที่ทำการลับ ดังแสดงวิธีการลับและทิศทางการลับที่ถูกต้องในรูปที่ 4.25 (ก) และ (ข) ตามลำดับอ้างอิงตาม Larry Jeffus (2011)

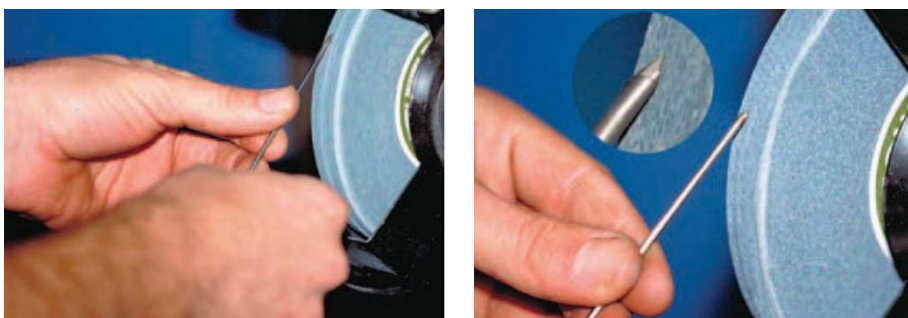


(ก) แบบชนิดพกพา (Portable)

(ข) แบบชนิดติดตั้งประจำตำแหน่ง (Stationary)

รูปที่ 4.24 เครื่องลับลวดทังสเตน (Grinding tungsten electrode machine)

ที่มา : The Publications of the welder, Tungsten Electrode, 2017



(ก) วิธีการลับลวดทังสเตนที่ถูกต้อง

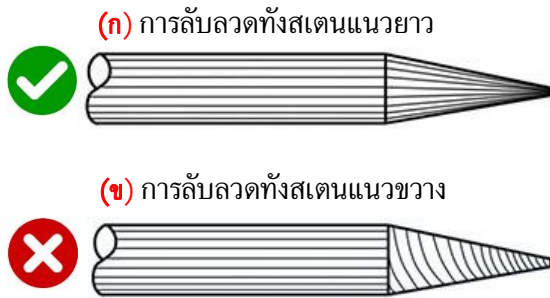
(ข) ทิศทางการลับลวดทังสเตนที่ถูกต้อง

รูปที่ 4.25 วิธีการลับลวดทังสเตนด้วยล้อหินขัดที่ถูกต้อง

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication, 2011

การลับหรือปรับแต่งลวดทังสเตนจะต้องลับตามแนวยาวของลวดทังสเตน เหตุผลเพราะตามแนวยาวจะช่วยให้การส่งถ่ายกระแสไฟเชื่อมเป็นทิศทางเดียวกัน ทำให้การควบคุมบ่อหลอมละลายทำได้ง่าย เปลวของกระแสไฟอาร์กจะเล็ก กำหนดขนาดของแนวเชื่อมได้ตามต้องการ ถ้ามลับตามแนวขวางการส่ง

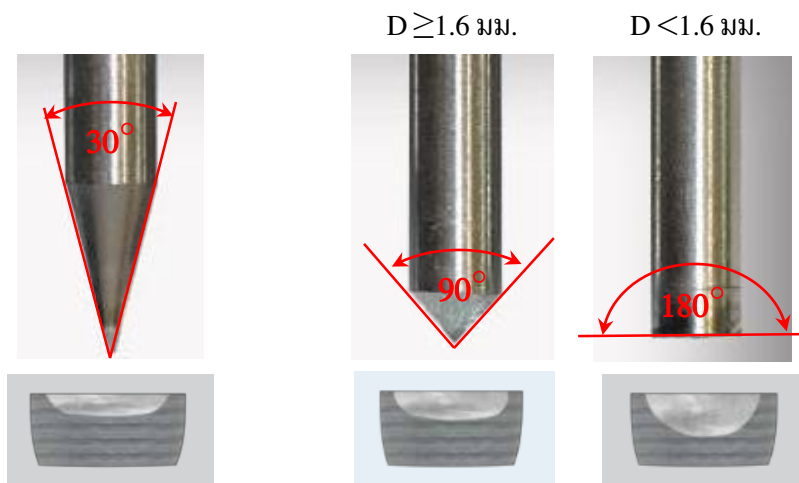
ถ้ากระแสมจะไม่สม่ำเสมอ และมีโอกาสที่ปลายลวดทั้งสแตนเลสจะแตกหักและหลุดเข้าไปรวมตัวกับน้ำโลหะในบ่อหลอมละลายกลายเป็นสารแปลกปลอม (Contaminated) ดังแสดงเปรียบเทียบลักษณะของการกลับลวดทั้งสแตนเลสตามแนวยาวกับตามแนวขวางในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบการกลับลวดทั้งสแตนเลส

ที่มา : *Winning Preparation, Proper preparation of tungsten electrodes for arc welding begins with the fundamentals 2015*

นอกจากการกลับปลายลวดที่ถูกต้องแล้วการกำหนดขนาดมุมของปลายลวดก็มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับขนาด ϕ ของลวดทั้งสแตนเลสที่สำคัญที่สุดคือ ชนิดของกระแสไฟเชื่อม กล่าวคือ กระแสไฟเชื่อมชนิดกระแสไฟตรงมุมของปลายลวดโดยประมาณ 30° ส่วนกระแสไฟเชื่อมชนิดกระแสไฟสลับ กรณีสถานะ ϕ ลวด ≥ 1.6 มม. มุมกลับของปลายลวดจะประมาณ 90° แต่ถ้าขนาดของ ϕ ลวด < 1.6 มม. มุมกลับของปลายลวดจะกว้างมากขึ้นจนแบนราบถึง 180° ซึ่งขนาดองศาของมุมปลายลวดทั้งสแตนเลสจะมีผลต่อขนาดและรูปร่างของรอยเชื่อม ดังแสดงลักษณะมุมของปลายลวดทั้งสแตนเลสที่เหมาะสมของแต่ละชนิดกระแสไฟเชื่อมและขนาดรูปร่างของรอยเชื่อมในรูปที่ 4.27 และได้รวบรวมอิทธิพลของลวดทั้งสแตนเลสที่มีต่อขบวนการเชื่อมทิก ดังแสดงในตารางที่ 4.8 โดยอ้างอิงข้อมูลของ Roger Timings (2008)



(ก) กระแสไฟตรง (DC)

(ข) กระแสไฟสลับ (AC)

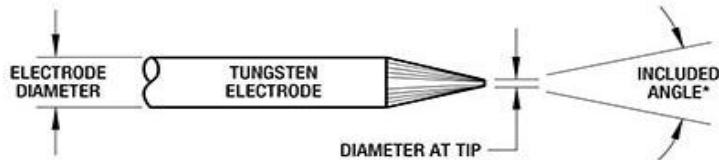
รูปที่ 4.27 ลักษณะของมุมกลับปลายลวดทั้งสแตนเลสสำหรับไฟกระแสตรงและกระแสสลับ

ที่มา : *Welding Design & Fabrication, 2015*

ตารางที่ 4.8 ขนาดของปลายลวดทั้งสแตน มุมรวม และช่วงของกระแสไฟเชื่อม

ที่มา : World Wide, The Standard in TIG Welding 2017

| ขนาด Ø ของ ลวดทั้งสแตน | | ขนาด Ø ของปลาย ลวดทั้งสแตน (TIP) | | มุมรวม (Included angle) | ช่วงกระแสไฟ | ช่วงกระแสไฟ ระบบพัลส์ |
|---------------------------|-------|-------------------------------------|-------|----------------------------|-------------|--------------------------|
| มิลลิเมตร | นิ้ว | มิลลิเมตร | นิ้ว | ° | แอมแปร์ | แอมแปร์ |
| 1.0 | 0.040 | 0.125 | 0.005 | 12° | 2-15 | 2-25 |
| 1.0 | 0.040 | 0.250 | 0.010 | 20° | 5-30 | 5-60 |
| 1.6 | 1/16 | 0.500 | 0.020 | 25° | 8-50 | 8-100 |
| 1.6 | 1/16 | 0.800 | 0.030 | 30° | 10-70 | 10-140 |
| 2.4 | 3/32 | 0.800 | 0.030 | 12° | 12-90 | 12-180 |
| 2.4 | 3/32 | 1.100 | 0.045 | 12° | 15-150 | 15-250 |
| 3.2 | 1/8 | 1.100 | 0.045 | 12° | 20-200 | 20-300 |
| 3.2 | 1/8 | 1.500 | 0.060 | 12° | 25-250 | 25-350 |



4. แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม (Shielding gases)

การเชื่อมทิกมีความจำเป็นที่จะต้องใช้อัดเฉื่อย (Inert gases) เพื่อทำหน้าที่ปกคลุมบ่อหลอมละลายจากบรรยากาศภายนอก การเลือกใช้ชนิดของแก๊สปกคลุมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของโลหะงานที่เชื่อม การออกแบบรอยต่อ และคุณสมบัติของแนวเชื่อม ซึ่งรวมถึงความสามารถของแก๊สในการช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพในการอาร์ก แก๊สปกคลุมที่นิยมใช้ในการปกคลุม ซึ่งได้เผยแพร่อยู่ในบทความของ CK Worldwide (2017) ได้แก่

- แก๊สอาร์กอน (Argon : Ar) เป็นแก๊สเฉื่อยที่ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด มักจะเรียกขบวนการเชื่อมทิกนี้ว่า “การเชื่อมอาร์กอน” เพราะสามารถใช้เชื่อมกับโลหะทุกชนิด มีความสม่ำเสมอในการอาร์ก ช่วยในการจัดผิวออกไซด์ได้ดี (Arc cleaning action) ช่วยอาร์กเริ่มต้นได้ดีและราคาค่อนข้างถูก

- แก๊สฮีเลียม (Helium : He) เป็นแก๊สเฉื่อยมีสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี ให้ค่าความร้อนสูงเหมาะกับการเชื่อมแบบอัตโนมัติ แนวเชื่อมมีอัตราการซึมลึกที่สูงสามารถเชื่อมได้เร็ว และเชื่อมได้กับโลหะทุกชนิด แต่ราคาค่อนข้างสูง



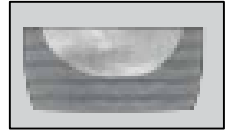







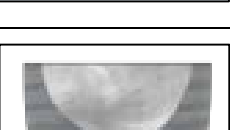



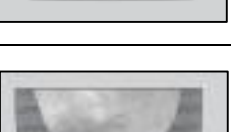
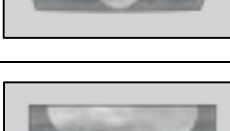
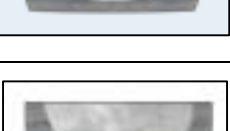
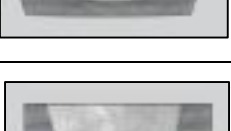
- แก๊สอาร์กอนผสมฮีเลียม (Ar + 15-75% He) เป็นแก๊สปกคลุมแบบผสมที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษของแก๊สเพื่อช่วยในการลดรูป รุน ลดอัตราการแตกร้าว ลดการบิดงอ และเหมาะสำหรับระบบการเชื่อมแบบอัตโนมัติ (Automatic welding)

● แก๊สอาร์กอนผสมไฮโดรเจน (Ar + 7% He) เป็นแก๊สปกคลุมแบบผสมที่ต้องการเพิ่มความร้อนแก่งานเชื่อมเพื่อสามารถเชื่อมได้รวดเร็วมากขึ้นเพราะเป็นแก๊สแอคทีฟ เหมาะกับการเชื่อมโลหะงานจำพวกเหล็กกล้าไร้สนิมหรือเหล็กกล้าผสมโครเมียมและนิกเกิลสูง เป็นต้น

จากการทดลองวิจัยในการใช้แก๊สปกคลุมแต่ละชนิด พบว่ามีอิทธิพลต่อขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม ดังแสดงเปรียบเทียบใน **ตารางที่ 4.9**

ตารางที่ 4.9 อิทธิพลของชนิดแก๊สปกคลุมที่มีผลต่อขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม

ที่มา : CK World Wide, The Standard in TIG Welding, 2017

| ชนิดของแก๊สปกคลุม (Gas type) | รูปร่างของแนวเชื่อม (Weld penetration profile) | | |
|---------------------------------|---|---|---|
| | มุมลวดทั้งส텐 30° | มุมลวดทั้งส텐 60° | มุมลวดทั้งส텐 90° |
| 100%Ar |  |  |  |
| 75%Ar + 25%He |  |  |  |
| 50%Ar + 50%He |  |  |  |
| 25%Ar + 75%He |  |  |  |
| 100%He |  |  |  |
| 95%Ar + 5%H ₂ |  |  |  |

5. การเพิ่มกระแสขณะเริ่มอาร์ก (Hot Start) และการรักษาระยะอาร์ก (Arc Force)

การเพิ่มกระแสขณะเริ่มอาร์ก (Hot Start) Larry Jeffus (2011) ได้กล่าวถึงการเชื่อมที่กว่าเป็นการเชื่อมที่อาศัยการอาร์กเริ่มต้นจากปลายของลวดทั้งสแตน สำหรับช่างเชื่อมฝึกหัด หรือยังขาดความชำนาญจะยากในการที่จะควบคุมปลายลวดเพื่อการอาร์ก โดยเฉพาะการเชื่อมที่กระแสไฟต่ำ ถ้าเชื่อมที่กระแสไฟที่สูงขึ้นจะควบคุมการเริ่มต้นอาร์กได้ง่ายขึ้นตามลำดับ ดังนั้น เพื่อการเริ่มต้นการอาร์กที่ง่าย ผู้ผลิตจึงได้ออกแบบให้เครื่องเชื่อมมีปุ่ม Hot Start ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.28 โดยหน้าที่หลักของปุ่ม Hot Start คือ ช่วยเพิ่มกระแสไฟเมื่อขณะเริ่มต้นเชื่อมที่ 1–10% ของกระแสไฟเชื่อมที่กำหนด จากรูปที่ 4.29 (ก) แสดงลักษณะของกระแสไฟเชื่อมมาตรฐานหรือปกติของกระแสไฟเชื่อมเริ่มต้น ส่วนรูปที่ 4.29 (ข) เป็นการเริ่มต้นเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมด้วยระบบ Hot Start ซึ่งกระแสไฟเชื่อมขณะเริ่มต้นอาร์กจะสูงกว่ากระแสไฟเชื่อมที่กำหนด และลดลงเมื่อเวลาผ่านไปโดยปกติใช้เวลาประมาณ 0.5 วินาที จากนั้นระดับกระแสไฟเชื่อมก็จะอาร์กอย่างต่อเนื่องที่กระแสไฟเชื่อมที่กำหนดจนสิ้นสุดการเชื่อม ตัวอย่างเช่น เมื่อช่างเชื่อมกำหนดตั้งกระแสไฟเชื่อมไว้ที่ 100 A แล้วหมุนปรับตั้งปุ่ม Hot Start ไว้ที่ 10% เมื่อเริ่มต้นอาร์กกระแสไฟเชื่อมจะขึ้นไปเป็น 110 A เป็นเวลา 0.5 วินาที เมื่อจรดปลายลวดทั้งสแตนลงบนชิ้นงานการอาร์กก็ง่ายขึ้น หลังจากนั้นกระแสจะกลับลดลงมาอยู่ที่ 100 A ตามที่กำหนดตั้งไว้ดังเดิม



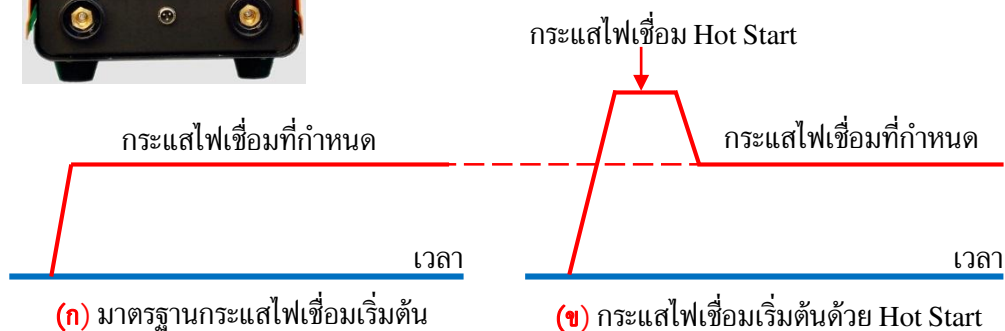
Hot Start

Arc Force

Current

รูปที่ 4.28 แสดงตำแหน่ง Hot Start และตำแหน่ง Arc Force บนหน้าแผงควบคุมของเครื่องเชื่อม

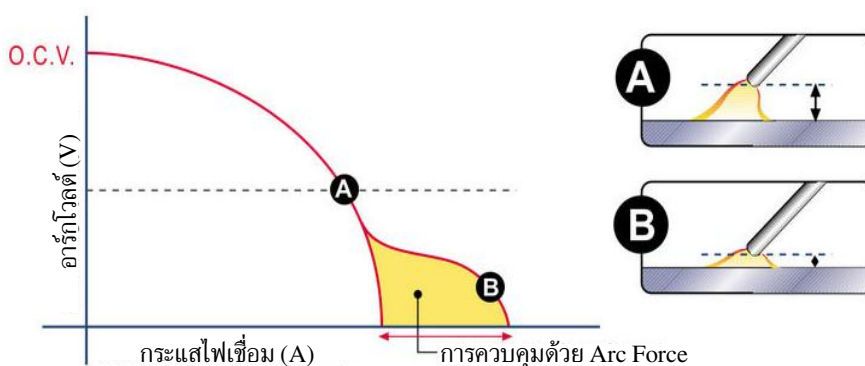
ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metal Fabrication 2011*



รูปที่ 4.29 วิธีการเริ่มต้นการอาร์กเชื่อม (ก) ระบบมาตรฐานและ (ข) ระบบที่มี Hot Start

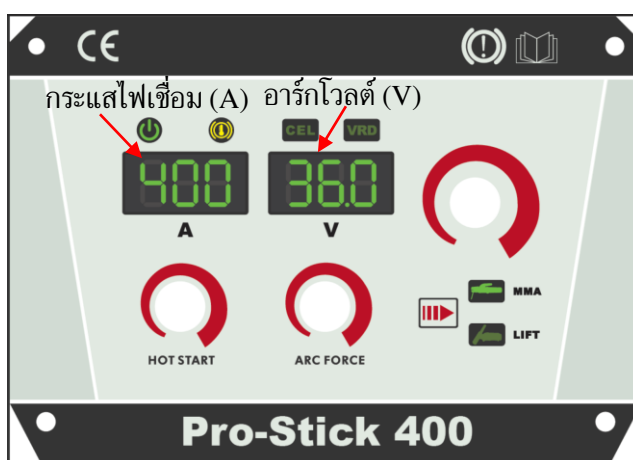
ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metal Fabrication 2011*

การรักษาระยะอาร์ก (Arc Force) เป็นปุ่มที่อยู่บนหน้าแผงควบคุมของเครื่องเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.28 ทำหน้าที่ต่อจาก Hot Start ในการเพิ่มหรือลดกระแสไฟเชื่อมอย่างรวดเร็วและทันที โดยจะช่วยให้การรักษาระยะอาร์กให้เหมาะสมคงที่อยู่ตลอดเวลา กล่าวคือ ขณะทำการเชื่อมโดยเฉพาะการเชื่อมด้วยมือช่างเชื่อมระยะอาร์กอาจไม่สม่ำเสมอ เช่น ถ้าระยะอาร์กชิดมากเกินไปแรงดันอาร์กจะลดลง ระบบของ Arc Force จะทำหน้าที่ทันทีโดยปรับเพิ่มกระแสไฟให้สูงขึ้น อุณหภูมิหลอมเหลวจะเพิ่มขึ้นตาม การอาร์กก็น่าขึ้น ป้องกันปลายลวดทั้งสแตนดัดกับผิวชิ้นงาน ในทางตรงกันข้ามถ้าระยะอาร์กห่างมากเกินไปแรงดันอาร์กจะเพิ่มสูงขึ้น ระบบของ Arc Force จะทำหน้าที่ปรับลดกระแสไฟลงเพื่อควบคุมลดขนาดของบ่อหลอมละลายให้เล็กลง โดยระบบ Arc Force ที่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และตัวอย่าง ของการแสดงผลที่แผงควบคุมของเครื่องเชื่อมของ Hot Start กับ Arc Force ในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.30 ระบบกลไกการทำหน้าที่รักษาระยะอาร์กของระบบ Arc Force

ที่มา : Manual Arc Welding E201, Heavy Industrial Application

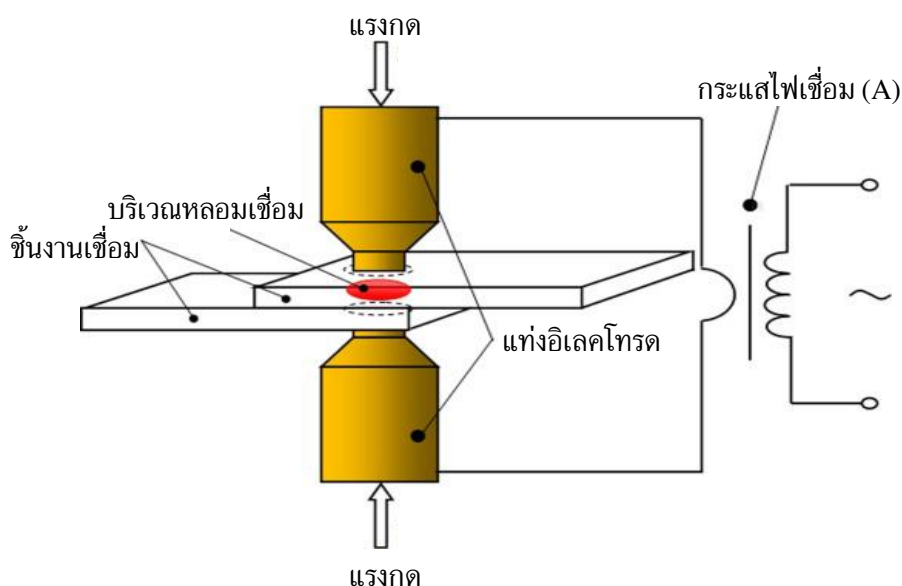


รูปที่ 4.31 ตัวอย่างการแสดงผลที่แผงควบคุมของเครื่องเชื่อมของ Hot Start กับ Arc Force

ที่มา : HIFA Electric Co., Ltd. Product Categories, 2017.

4.3 กรรมวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance Welding : RW)

เป็นการเชื่อมโลหะโดยอาศัยหลักการสร้างความร้อนเพื่อการหลอมละลายด้วยการใช้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านโลหะที่มีความต้านทานไฟฟ้า (Resistance current) ซึ่งบริเวณที่มีความต้านทานสูง คือ ตำแหน่งผิวรอยต่อของโลหะงานทั้งสองชิ้นสัมผัสผัสนกัน และตำแหน่งนี้จะเกิดความร้อนสูงสุดจนทำให้เกิดการหลอมละลายที่ผิวงานทั้งคู่จนเป็นบ่อหลอมละลายและจะหลอมเชื่อมติดกัน บ่อหลอมละลายจะขึ้นและมีพื้นที่ไม่กว้างมาก การเชื่อมแบบความต้านทานนี้ไม่ต้องมีแก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลาย ไม่มีมลพิษ ความร้อนบริเวณการเชื่อมไม่มากเหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะแผ่น (Sheet) เป็นขบวนการเชื่อมที่ไม่ต้องอาศัยทักษะของช่างเชื่อมมากนัก ส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์อัตโนมัติ ที่กล่าวโดย Luo Yi et al. (2016) โดยมีข้อจำกัดกับการประยุกต์ใช้งานที่ไม่หลากหลาย เครื่องเชื่อมและอุปกรณ์ราคาค่อนข้างสูง ดังแสดงกลไกระบบของการเชื่อมในรูปที่ 4.32 และ AMDA Weld Tech Inc (2020) ซึ่งได้แยกขบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานออกเป็นแบบวิธีย่อยตามรูปแบบลักษณะของงานที่เชื่อมได้ 6 รูปแบบ ดังนี้



รูปที่ 4.32 กลไกระบบของการเชื่อมแบบความต้านทาน (Resistance welding)

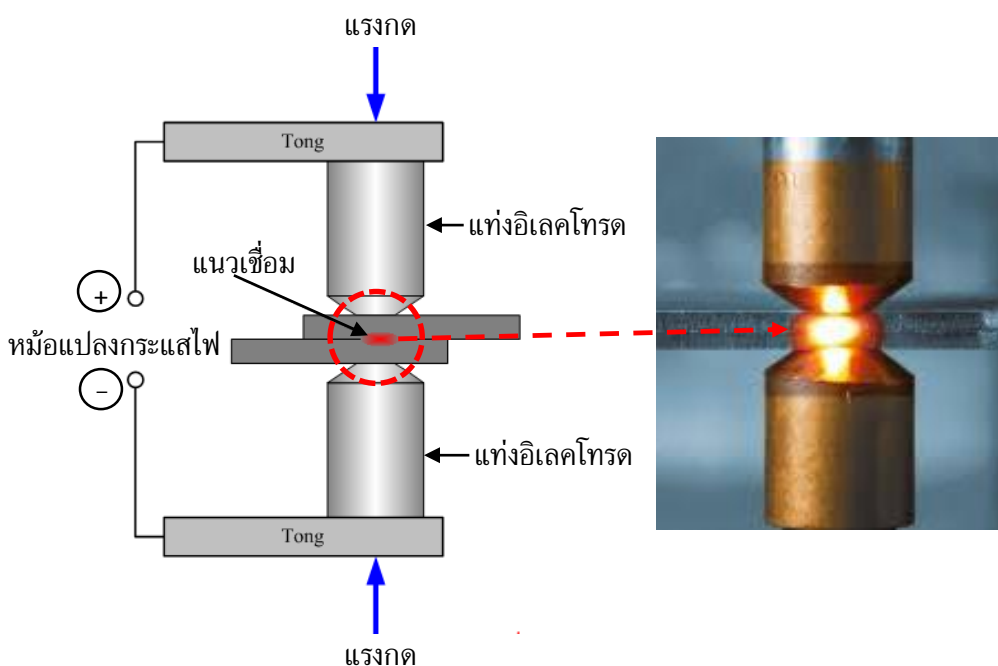
ที่มา : Luo Yi et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 229 (2016) 492–500

4.3.1 การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding)

การเชื่อมที่อาศัยความต้านทานแบบจุดนี้มีชื่อที่นิยมเรียกกันทั่วไปว่า การเชื่อม Spot ซึ่งเป็นการเชื่อมแบบหลอมละลายที่แนวเชื่อมมีลักษณะเป็นจุด ๆ โดยชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมต้องวางเกยทับสัมผัสผัสนกันพอดี ซึ่งใช้ความร้อนสำหรับการหลอมละลายโลหะชิ้นงานให้ติดกันนั้น อาศัยหลักการความต้านทานกระแสไฟฟ้าของวัสดุโลหะ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้แบบสเต็ปดาวน์ (Step-Down Transformer) คือ แปลงไฟฟ้าจากระบบความดันสูง-กระแสต่ำ แปลงเป็นระบบแรงดันต่ำ-กระแสสูง

เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วแท่งโลหะที่เป็นอิเล็กโทรดซึ่งจะเป็นโลหะทองแดงผสม (Copper alloy) ซึ่งมี 2 แท่งขั้ว คือ แท่งขั้วบวก (+) และแท่งขั้วลบ (-) เมื่อใช้แรงกดให้ปลายของแท่งขั้วทั้งสองเคลื่อนที่มาสัมผัสกับผิวของโลหะชิ้นงาน จะทำให้กระแสไฟฟ้าแบบแรงดันต่ำ-กระแสสูงในปริมาณที่มากไหลไปสู่โลหะงานเพื่อจะไหลต่อไปยังแท่งขั้วตรงข้าม ซึ่งจะต้องผ่านผิวของโลหะงานอีกชั้น ด้วยเพราะกระแสไฟที่มากแต่มีพื้นที่สัมผัสที่ปลายแท่งขั้วอิเล็กโทรดที่สัมผัสอยู่กับผิวโลหะงานน้อย จึงเกิดเป็นความร้อนขึ้นที่บริเวณผิวของโลหะงานสองชิ้นที่ต่อแยกและสัมผัสกันตรงตำแหน่งที่ตรงกับปลายของแท่งขั้วอิเล็กโทรด ผิวโลหะชิ้นงานทั้งคู่เริ่มหลอมละลายและติดกันเป็นแนวเชื่อมที่เป็นจุด การเชื่อมติดกันนอกจากการหลอมละลายแล้วส่วนหนึ่งเกิดจากแรงกดของปลายหัวอิเล็กโทรด ดังแสดงระบบกลไกของการเชื่อมจุดในรูปที่ 4.33

การเชื่อมความต้านทานแบบจุดนี้เหมาะกับงานโลหะแผ่นบาง โดยวางเกยซ้อนกันหนาไม่เกิน 3 มิลลิเมตร เป็นการเชื่อมที่ไม่มีการเติมลวดเชื่อมใช้พลังงานความร้อนน้อยกว่าการเชื่อมแบบวิธีอื่น ๆ ชิ้นงานเชื่อมไม่เกิดการเสียรูปหรือบิดงอ ทำงานได้รวดเร็ว แนวเชื่อมมีความแข็งแรงต่ำกว่าขบวนการเชื่อมวิธีอื่น ๆ แท่งขั้วอิเล็กโทรดจะเกิดความร้อนสะสมเมื่อเชื่อมอย่างต่อเนื่องจึง ต้องมีระบบระบายความร้อนของแท่งทองแดงผสมที่เป็นอิเล็กโทรด กรณีเชื่อมโลหะงานแผ่นบาง ๆ นิยมใช้ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศหรือลม (Air cooling) ส่วนกรณีโลหะงานหนาจะใช้ระบบระบายความร้อนด้วยระบบน้ำ (Water cooling)

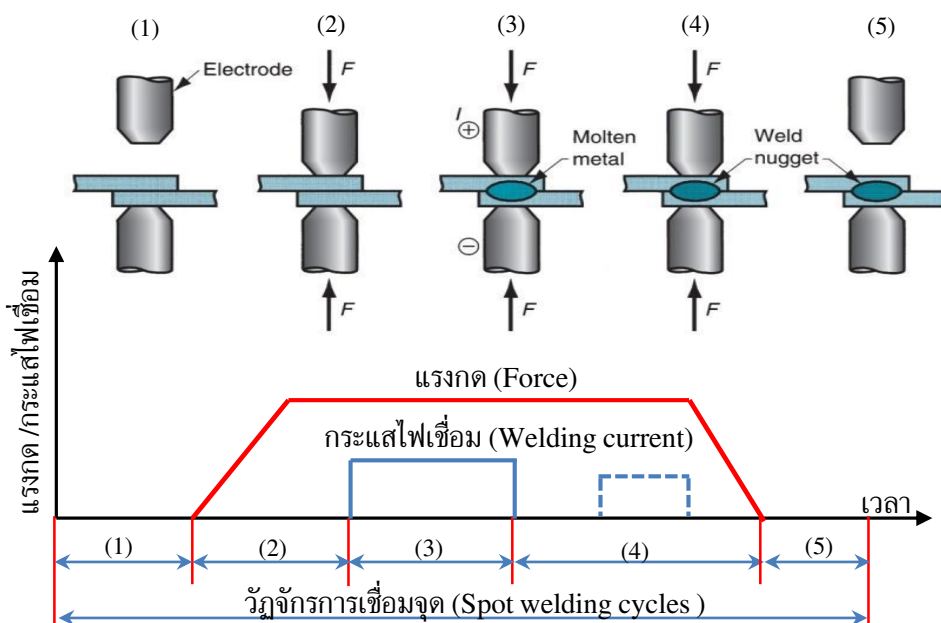


รูปที่ 4.33 กลไกระบบของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding)

ที่มา : MOHAMAD AQEEL AL-JADER, Thesis of the Degree of Doctor of Philosophy, 2014

วัฏจักรของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding cycles)

การเชื่อมความต้านทานแบบจุดถึงแม้จะใช้เวลาในการเชื่อมที่สั้นต่อจุดที่เชื่อมก็ตาม ในช่วงเวลาของการเชื่อมเริ่มต้นและเชื่อมเสร็จสิ้นก็มีลำดับ (Step) ของการเชื่อมที่ต้องเกี่ยวข้องกับกระแสไฟเชื่อม (Welding current) แรงกดเชื่อม (Welding force) และเวลาของการเชื่อม (Welding time) ดังแสดงในรูปที่ 4.34 พร้อมคำอธิบายของแต่ละลำดับขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 4.34 วัฏจักรของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Spot welding cycles)

ที่มา : MOHAMAD AQEEL AL-JADER, Thesis of the Degree of Doctor of Philosophy, 2014

ลำดับที่ (1) เตรียมโลหะแผ่นชิ้นงานเชื่อมวางเกย โดยกำหนดตำแหน่งที่จะเชื่อมวางให้ตรงกับปลายของแท่งขั้วอิเล็กโทรด ขั้นตอนนี้ไม่มีกระแสไฟเชื่อมและไม่มีแรงกดมีแต่เวลาที่ต้องดำเนินการ

ลำดับที่ (2) เลื่อนแท่งขั้วอิเล็กโทรดเข้ามาให้สัมผัสกับผิวของโลหะงานโดยใช้แรงกดที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้น กดจนผิวสัมผัสทุกส่วนแนบสนิทกัน ขั้นตอนนี้ยังไม่มีกระแสไฟเชื่อม ใช้เวลาเพิ่มขึ้น ช่วงเวลานี้เรียกว่า ช่วงเวลาบังคับ (Squeezing time)

ลำดับที่ (3) แรงกดสูงสุด ขณะเดียวกันก็ปล่อยกระแสไฟเชื่อมสูงสุด ผิวชิ้นงานหลอมละลายกดแก้ไข วนเวลาผ่านไประบบไฟฟ้าจะตัด แต่แรงกดยังคงอยู่เพื่อกดแก้ไขให้บ่อหลอมละลายติดกันแน่น ใช้เวลาเพิ่มขึ้น ช่วงเวลานี้เรียกว่า ช่วงเวลาเชื่อม (Welding time)

ลำดับที่ (4) แรงกดยังคงสูงสุดเพื่อกดให้แนวเชื่อมติดกัน โดยอาจตั้งระบบปล่อยกระแสไฟเชื่อมอีกครั้งกรณีต้องการส่วนที่หลอมละลายเพิ่ม ใช้เวลาเพิ่มขึ้น ช่วงเวลานี้เรียกว่า ช่วงเวลายึด (Holding time)

ลำดับที่ (5) ขั้นตอนสุดท้ายเมื่อส่วนหลอมละลายเย็นตัวติดกัน ปลดแรงกด เคลื่อนแท่งอิเล็กโทรดออก เสร็จสิ้นวัฏจักรขบวนการเชื่อม ใช้เวลาเพิ่มขึ้น ช่วงเวลานี้เรียกว่า ช่วงเวลาหยุด (Off time)

ความร้อนของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding)

ปริมาณของความร้อนที่ต้องการเพื่อสร้างบ่อหลอมละลายจะอาศัยหลักการของความต้านทานกระแสไฟฟ้า โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจากปัจจัยสำคัญ 3 ประการ ดังนี้

1. ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานโลหะ ซึ่งก็คือค่า “I” โดยคิดเป็นค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) ต่อพื้นที่หน้าตัดของแท่งขั้วอิเล็กโทรด กรณีที่ป้อนปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่มากจะส่งผลให้เกิดปริมาณความร้อนที่สูงขึ้น ซึ่งทำให้ใช้เวลาในการเชื่อมลดลงและสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของแท่งขั้วอิเล็กโทรด อย่างไรก็ตาม การที่จะเลือกหรือปรับปริมาณของกระแสไฟฟ้าต้องคำนึงถึงกำลังความสามารถหรือประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อมเป็นสำคัญ

กระแสไฟเชื่อมที่ใช้สำหรับการเชื่อม มี 2 แบบ คือ

- กระแสไฟเชื่อมแบบกระแสเชื่อมคงที่ (Content current) เป็นกระแสเชื่อมที่เลือกใช้ในการเชื่อมโลหะงานที่ไม่ต้องเตรียมหรือปรับสภาพผิวชิ้นงานให้ดีมากก็สามารถทำการเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นที่นิยมใช้ในการเชื่อมโลหะที่ไม่มีการเคลือบผิว (Non-coating metal)

- กระแสไฟเชื่อมแบบกระแสเชื่อมพัลส์ (Pulse current) เป็นกระแสไฟเชื่อมที่ป้อนเข้ามาเป็นจังหวะ (Square wave) สูงและต่ำ เป็นกระแสไฟที่เหมาะสมกับการเชื่อมโลหะที่ผ่านการเคลือบผิว (Coating metal) เช่น โลหะแผ่นเคลือบสังกะสี เคลือบดีบุก หรือเคลือบสีป้องกันสนิม เป็นต้น

2. ปริมาณค่าความต้านทาน ซึ่งก็คือค่า “R” โดยเป็นค่าที่ต้านทานกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามา หากแต่ไหลผ่านออกไปได้น้อย ยิ่งต้านทานมากก็ยิ่งส่งผลให้เกิดความร้อนมากขึ้น ดังนั้น ค่าความต้านทานจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดปริมาณความร้อนของการเชื่อมแบบความต้านทาน

3. เวลาที่ป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โลหะชิ้นงาน ซึ่งก็คือค่า “t” เป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น กรณีถ้าเวลาป้อนกระแสไฟฟ้านานขึ้นความร้อนที่เกิดจากการต้านกระแสไฟฟ้าจะสูงขึ้นตามในทางตรงกันข้ามถ้าใช้เวลาป้อนกระแสไฟฟ้าน้อยค่าความร้อนที่ได้จะลดลงตาม

จากปัจจัยสำคัญทั้ง 3 ประการข้างต้นสามารถเขียนเป็นสมการที่มาของความร้อนที่จะใช้ในการเชื่อมแบบความต้านทานนี้ว่า

$$H = I^2 \times R \times t$$

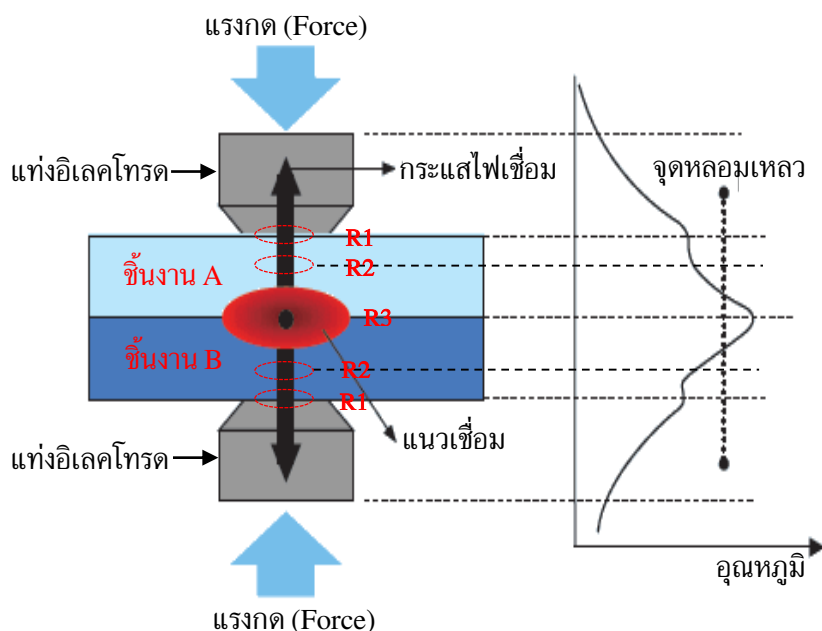
เมื่อ H = ค่าความร้อนสำหรับการหลอมละลาย (Heat in put)

I = ปริมาณกระแสไฟเชื่อม (Alternating current : AC)

t = เวลาที่ใช้ในการป้อนกระแสไฟเชื่อม (Time)

ความสัมพันธ์ของความต้านทานกับความร้อนของการเชื่อมแบบจุด

ความต้านทานที่เกิดขึ้นในขบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด จะเกิดความต้านทานขึ้นในตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.35 ได้แก่ ตำแหน่งระหว่างแท่งขั้วอิเล็กโทรดและโลหะชิ้นงาน (R1) ความต้านทานที่เกิดขึ้นในเนื้อของโลหะชิ้นงาน (R2) และความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวโลหะชิ้นงานของทั้งสองชิ้น (R3) ซึ่งแต่ละตำแหน่งมีระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยที่ตำแหน่ง (R3) มีอุณหภูมิสูงที่สุดนั่นคือจุดหลอมเหลวและจะลดลงเรื่อย ๆ ตามลำดับที่ตำแหน่ง (R2) และ (R1)



รูปที่ 4.35 ตำแหน่งค่าความต้านทานของขบวนการเชื่อมจุดและอุณหภูมิของการเชื่อม

ที่มา: WSI, Weld Systems Integrators, Inc. Resistance Welding Products, 2019

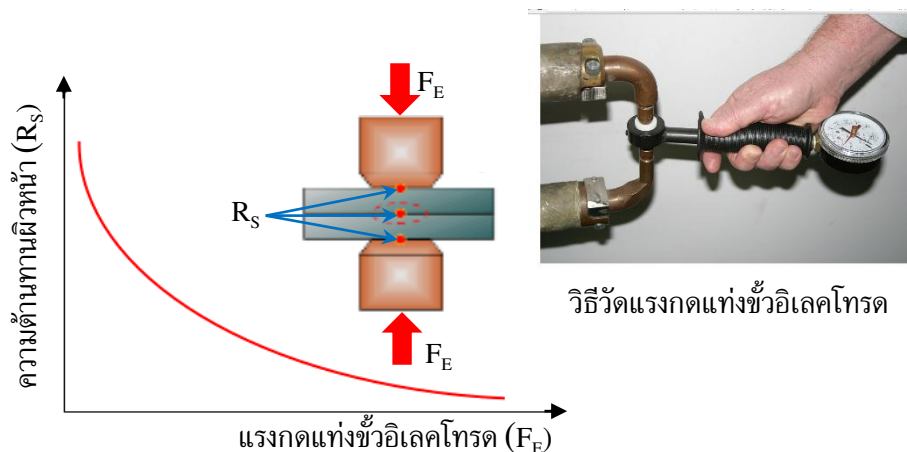
R1 หมายถึง ความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างแท่งขั้วอิเล็กโทรดและชิ้นงาน ซึ่งค่าความต้านทานสามารถลดให้น้อยลงได้ โดยการปรับผิวหน้าสัมผัสของปลายแท่งขั้วอิเล็กโทรดให้เรียบและสะอาด รวมถึงขนาดและชนิดของแท่งขั้วอิเล็กโทรด นอกจากนี้ยังรวมถึงปริมาณแรงกดของแท่งอิเล็กโทรดด้วย

R2 หมายถึง ความต้านทานที่เกิดขึ้นในเนื้อของโลหะชิ้นงาน ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นตำแหน่งนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาของโลหะชิ้นงาน

R3 หมายถึง ความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวโลหะชิ้นงานของทั้งสองชิ้น

ดังนั้น โดยสรุปหลักของการเกิดความต้านทานในขบวนการเชื่อมแบบจุดสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ ค่าความต้านทาน $R_1 > R_2 < R_3$ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านทานนี้ยังขึ้นอยู่กับสภาพผิวของแท่งขั้วอิเล็กโทรดและผิวชิ้นงาน ซึ่งเรียกว่าค่าความต้านทานที่ผิว (Surface resistance) โดยค่าความต้านทานที่ผิวดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับปริมาณแรงกดของแท่งขั้วอิเล็กโทรด ที่วัดได้

จากเครื่องมือเกจวัดแรงกดอิเล็กโทรด (Electrode force gauge) ดังแสดงในรูปที่ 4.36 เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์เห็นได้ชัดแล้วว่า กรณีที่แรงกดจากแท่งขั้วอิเล็กโทรดน้อย ค่าความต้านทานที่ผิว (R_s) ไม่ว่าจะเป็นผิวระหว่างแท่งขั้วอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน หรือชิ้นงานกับชิ้นงานจะมีค่าความต้านทานที่สูง และมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อแรงกดของแท่งขั้วอิเล็กโทรดเพิ่มสูงขึ้น เหตุผลเพราะพื้นที่ผิวสัมผัส (Surface contact) แนบสนิทมากขึ้นกระแสไหลผ่านไปได้มากขึ้นความต้านจึงลดลง



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ค่าความต้านทานที่ผิวกับแรงกดของแท่งขั้วอิเล็กโทรด

ที่มา : SIAM PART PRODUCTS, Spot Welding Level 2 for Technicians, 2014

ความสัมพันธ์ของขนาดแนวเชื่อม กระแสไฟเชื่อม และเวลาเชื่อม ของขบวนการเชื่อมแบบจุด

M. Pouranvari (2011) ได้อธิบายถึงขนาดของแนวเชื่อมที่ได้หลังจากการเชื่อมเป็นเป้าหมายอันสำคัญยิ่งของทุกขบวนการเชื่อม โดยปกติแนวเชื่อมจากขบวนการเชื่อมอื่น ๆ จะควบคุมขนาดของแนวเชื่อมในเรื่องด้านต่าง ๆ เช่น ควบคุมสัดส่วนความกว้างต่อความลึกของแนวเชื่อม (Depth/Width) ควบคุมความนูนของแนวเชื่อม (Root penetration) หรือขนาดความกว้างของแนวเชื่อมมุม (Leg size of fillet weld) เป็นต้น แต่สำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดจะวัดขนาดของแนวเชื่อมด้วยขนาด ϕ ของรอยเชื่อม ด้วยเพราะแนวเชื่อมเป็นจุดวงกลมตามรูปทรงของแท่งขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้เชื่อม ซึ่งขนาดของวงกลมแนวเชื่อม (Nugget diameter) จะขึ้นอยู่กับกระแสไฟเชื่อม (Welding current) เวลาในการเชื่อม (Welding Time) ดังแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.37 ซึ่งจากรูปเห็นได้ว่าขนาดของ ϕ ของวงรอยเชื่อมที่ยอมรับได้ต้องเลือกขนาดของกระแสไฟและเวลาที่ใช้เชื่อมอย่างเหมาะสม ถ้าไม่เหมาะสมอาจได้แนวเชื่อมที่มี ϕ ของรอยเชื่อมที่เล็กเกินไปหรืออาจใหญ่เกินไปที่ซึ่งเกินเกณฑ์ที่จะยอมรับได้

นอกจากนี้ได้มีงานวิจัยที่ได้ศึกษารวบรวมมา พบว่า ยังมีปัจจัยอีกหลายเรื่องของการสมดุลความร้อนขณะทำการเชื่อม (Heat balance) โดยมีรูปแบบของการสมดุลความร้อนอยู่ 2 แบบ คือ

1. แบบสมดุลความร้อนอัตโนมัติ (Automatic heat balance) จะเกิดขึ้นกับเงื่อนไขของการเชื่อมในกรณีทำการเชื่อมโลหะงานชนิดเดียวกัน มีความหนาเท่ากัน และมีชนิด ขนาด และรูปร่างของแท่งขั้ว

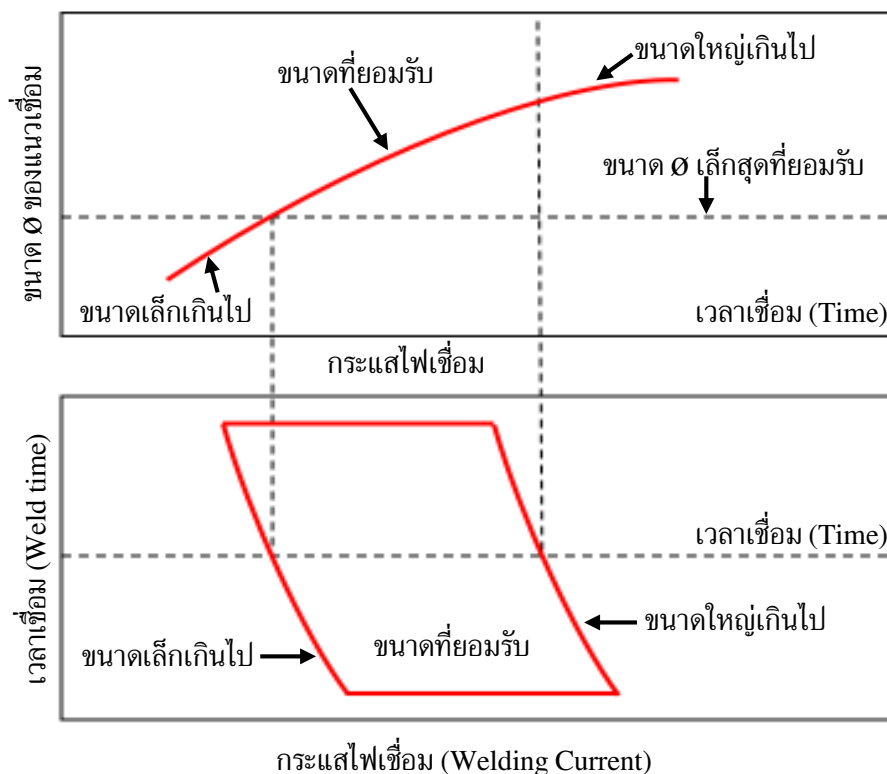
อิเล็กโทรดที่เหมือนกัน ซึ่งเงื่อนไขที่เชื่อมเหมือนกันดังกล่าวจะทำให้พฤติกรรมของการกระจายตัวของความร้อนไปในทิศทางต่าง ๆ ที่สมดุล ดังแสดงในรูปที่ 4.38

2. แบบสมดุลความร้อนไม่อัตโนมัติ (Non-automatic heat balance) จะเกิดขึ้นกับเงื่อนไขการเชื่อมในกรณีทำการเชื่อมโลหะงานต่างชนิดกัน โลหะชนิดเดียวกันแต่ความหนาต่างกัน และมีชนิด ขนาด และรูปร่างของแท่งขั้วอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นมีพฤติกรรมของการกระจายตัวแบบไม่สมดุลทุกทิศทาง เหตุผลเพราะความแตกต่างของเงื่อนไขดังที่กล่าวซึ่งมีสมบัติด้านความต้านทานกระแสไฟฟ้าไม่เท่ากันส่งผลให้เกิดความร้อนในปริมาณต่างกัน วิธีการแก้ไขสามารถทำได้ดังนี้

- กรณีเชื่อมโลหะชิ้นงานต่างชนิดกัน แก้ไขโดยการลดความร้อนในโลหะที่มีสมบัติด้านต้านทานกระแสไฟฟ้าสูง ด้วยวิธีการลดความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่ลง (A/mm^2) ซึ่งหมายถึงการเพิ่มขนาดของแท่งขั้วอิเล็กโทรด

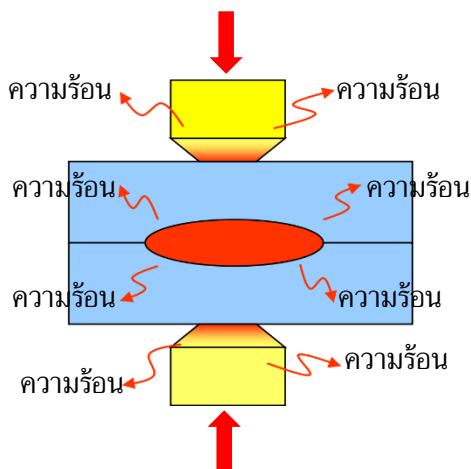
- กรณีเชื่อมโลหะชิ้นงานหนาต่างกัน แก้ไขโดยการลดความหนากับโลหะชิ้นงานที่มีค่าความต้านทานกระแสสูง เป็นการลดความร้อนลง

- กรณีการเชื่อมด้วยแท่งขั้วอิเล็กโทรดต่างชนิด ต่างขนาด และต่างรูปร่าง แก้ไขโดยการเพิ่มค่าความร้อนบนโลหะที่มีความต้านทานกระแสต่ำ ด้วยวิธีเลือกใช้แท่งขั้วอิเล็กโทรดที่มีความต้านทานสูง



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟเชื่อม เวลาเชื่อมที่มีผลต่อขนาดของแนวเชื่อม

ที่มา : SIAM PART PRODUCTS, Spot Welding Level 2 for Technicians, 2014



รูปที่ 4.38 การกระจายตัวสมดุลของ

ความร้อนของการเชื่อมแบบจุด

ที่มา : SIAM PART PRODUCTS, Spot

Welding Level 2 for Technicians, 2014

เครื่องมือและอุปกรณ์การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Welding equipment)

เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเชื่อมที่อาศัยความต้านทานแบบจุดนี้ มีส่วนประกอบน้อยชิ้น เพราะเป็นขบวนการเชื่อมที่ไม่ยุ่งยากหรือสลับซับซ้อนไม่ต้องใช้ลวดเชื่อม ไม่ต้องใช้แก๊สปกคลุมและบ่อหลอมละลายค่อนข้างเล็กบนแผ่นโลหะบาง เครื่องมือที่สำคัญและจำเป็นที่สุด คือ เครื่องเชื่อมแบบความต้านทาน (Welding resistance machine) โดยปกติเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดนี้มี 2 แบบให้เลือกใช้ ดังแสดงในรูปที่ 4.39 คือ

1. เครื่องเชื่อมที่ใช้สำหรับเชื่อมด้วยคน (Spot welder) เป็นเครื่องเชื่อมที่ใช้สำหรับการเชื่อมในลักษณะงานทั่วไป ซึ่งสามารถพบเห็นได้ 2 แบบ คือ

- เครื่องเชื่อมแบบพกพา (Portable spot welding machine) เป็นเครื่องเชื่อมที่มีขนาดเล็ก มีขนาดพอเหมาะกับการพกพาไปได้ในที่ต่าง ๆ จับถือได้ด้วยคนเชื่อม ออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับงานภาคสนามที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายงานไปเชื่อมในโรงงานได้ หรือมีตำแหน่งที่ต้องการเชื่อมปริมาณน้อย ตำแหน่ง เช่นงานซ่อมบำรุงต่าง ๆ รวมไปถึงการเชื่อมงานเฉพาะที่เข้าไปเชื่อมยาก เป็นต้น ลักษณะของเครื่องเชื่อมแบบพกพามีทั้งแบบ C-Type และ X-Type ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.39 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

- เครื่องเชื่อมแบบติดตั้งประจำตำแหน่ง (Stationary spot welding machine) เป็นเครื่องเชื่อมที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ติดตั้งประจำอยู่ในตำแหน่งงานเชื่อมในโรงงานอุตสาหกรรม กำลังการเชื่อมจะสูงมากสามารถเชื่อมงานได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ออกแบบมาเพื่อรองรับกับการเชื่อมงานในโรงงานผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ โดยเฉพาะชิ้นส่วนยานยนต์ ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องในรูปที่ 4.39 (ค)

2. เครื่องเชื่อมที่ใช้สำหรับเชื่อมด้วยหุ่นยนต์ (Robot spot welding machine) เป็นเครื่องเชื่อมที่ออกแบบมาเพื่อใช้กับการเชื่อมด้วยระบบที่สั่งการผ่านหุ่นยนต์หรือแขนกล (Welding robot arm) แทนคนเชื่อม ซึ่งเป็นระบบการเชื่อมแบบอัตโนมัติเชื่อมงานได้ดี รวดเร็ว มีประสิทธิภาพสูง มีความแม่นยำสูง

เชื่อมงานได้ติดต่อกันเป็นเวลานาน ๆ เหมาะกับระบบการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องเชื่อมแบบ C- Type และ แบบ X- Type ในรูปที่ 4.39 (ง) และ (จ) ตามลำดับ



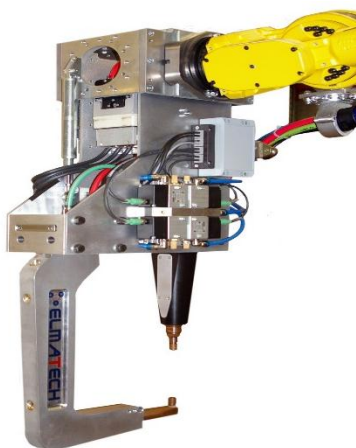
(ก) เครื่องเชื่อมจุดแบบพกพา (C-Type)



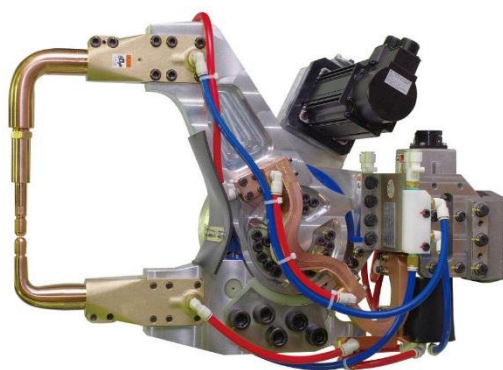
(ข) เครื่องเชื่อมจุดแบบพกพา (X-Type)



(ค) เครื่องเชื่อมจุดแบบติดตั้งประจำตำแหน่ง



(ง) เครื่องเชื่อมจุดแบบหุ่นยนต์ (C-Type)



(จ) เครื่องเชื่อมจุดแบบหุ่นยนต์ (X-Type)

รูปที่ 4.39 ชนิดเครื่องเชื่อมความต้านทาน แบบการเชื่อมจุด (Spot welding machine)

ที่มา : Dengensha Europe, Spot welding machine, 2016

แท่งขั้วอิเล็กโทรด (Electrode)

แท่งขั้วอิเล็กโทรดสำหรับขบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดถือว่ามีความสำคัญยิ่ง เพราะจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงลักษณะของแนวเชื่อมที่ได้จากหลังการเชื่อมเสร็จสิ้น โดยส่วนใหญ่ทำมาจากวัสดุโลหะทองแดงผสม (Copper alloy) ด้วยเหตุเพราะทองแดงมีคุณสมบัติที่เป็นตัวนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี ส่วนธาตุที่ผสมเข้าไป (Alloying) จุดประสงค์เพื่อเพิ่มเติมคุณสมบัติทางกลบางประการ เช่น เพิ่มความแข็งแรง (Strength) เพิ่มความคงทนต่อแรงกด (Compressive strength) แรงกระแทก (Impact strength) และเพิ่มความสามารถทนการสึกหรอที่ปลายของแท่งอิเล็กโทรด (Wear resistance) เป็นต้น คุณสมบัติทางกลเหล่านี้ต้องดีเยี่ยมสำหรับภาระหน้าที่ของแท่งขั้วอิเล็กโทรด โดยหน้าที่หลักของแท่งขั้วอิเล็กโทรดพอสรุปได้ดังต่อไปนี้

- ต้องทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าที่ดี ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลอย่างคงที่และสม่ำเสมอ (Uniform current density)
- ต้องทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟเชื่อมให้ไหลผ่านจุดหรือตำแหน่งที่ต้องการเชื่อมอย่างแม่นยำ (Concentrating current at weld)
- ต้องทำหน้าที่เป็นตัวนำและเป็นตัวกระจายความร้อนจากชิ้นงานโลหะได้ดี (Good thermal conductivity)

ชนิดของแท่งขั้วอิเล็กโทรด (Type of electrode)

วัสดุที่ใช้ทำแท่งขั้วอิเล็กโทรดจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณสมบัติว่าเหมาะสมกับการเชื่อมโลหะชนิดใด โดย Resistance Welding Machine & Accessory (2019) หรือที่รู้จักกันในนามของ สมาคม RWMA ภายใต้สมาคมการเชื่อมแห่งสหรัฐอเมริกา (AWS) ที่ได้ทำการแบ่งกลุ่มชนิดของแท่งขั้วอิเล็กโทรดตามองค์ประกอบของวัสดุที่ผสมเข้าไป ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

1. แท่งขั้วอิเล็กโทรด กลุ่ม A เป็นกลุ่มที่ผลิตจากโลหะทองแดงที่ผสมธาตุต่าง ๆ เพิ่มเข้าไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของแท่งขั้วอิเล็กโทรด โดย RWMA ได้แบ่งเป็นระดับ (Class) ต่าง ๆ ซึ่งค่าระดับที่สูงขึ้นหมายถึง แท่งอิเล็กโทรดมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่ตรงกันข้ามในคุณสมบัติของการนำกระแสไฟฟ้าและการนำความร้อนกลับลดลง ด้วยเหตุเพราะในแท่งขั้วอิเล็กโทรดมีปริมาณของธาตุที่ผสมอยู่ภายในมาก ระดับของแท่งขั้วอิเล็กโทรดที่แยกโดย RWMA มีรายละเอียดของแต่ละระดับ ดังต่อไปนี้

- แท่งขั้วอิเล็กโทรดระดับ RWMA Class I ผลิตจากวัสดุโลหะทองแดง-เซอร์โคเนียมผสม (Copper-Zirconium alloy) หรือมาตรฐาน ASTM คือ C15000 เหมาะสำหรับใช้ในการเชื่อมโลหะจำพวกอลูมิเนียมผสม แมกนีเซียมผสม ทองเหลือง และบรอนซ์ เป็นต้น

- แท่งขั้วอิเล็กโทรดระดับ RWMA Class II ผลิตจากวัสดุโลหะทองแดง-เซอร์โคเนียม-โครเมียมผสม (Copper-Zirconium-Chromium alloy) หรือมาตรฐาน ASTM คือ C18150 เป็นแท่งอิเล็กโทรดที่มีความแข็งแรงสูงกว่า Class I แต่มีคุณสมบัติในการนำกระแสไฟฟ้าลดลง เหมาะสำหรับ

การเชื่อมโลหะแผ่นเหล็กกล้าทั้งแบบรีดร้อนและรีดเย็นและโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม รวมถึงโลหะแผ่นเคลือบสังกะสี เป็นต้น

- แท่งขั้วอิเล็กโทรดระดับ RWMA Class III ผลิตจากวัสดุโลหะทองแดง-โคบอลต์-เบอริลเลียมผสม (Copper-Cobalt-Beryllium alloy) หรือมาตรฐาน ASTM คือ C17500 เป็นแท่งขั้วอิเล็กโทรดที่มีความแข็งแรงสูงมาก เหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมหรือโลหะแผ่นนิโครมและโมเนล เป็นต้น

- แท่งขั้วอิเล็กโทรดระดับ RWMA Class IV ผลิตจากวัสดุโลหะทองแดง-เบอริลเลียมผสม (Copper-Beryllium alloy) หรือมาตรฐาน ASTM คือ C17200 เป็นแท่งขั้วอิเล็กโทรดที่มีคุณสมบัติความแข็งแรงสูงกว่า Class III สามารถรองรับแรงกดมาก ๆ ได้ขณะเชื่อมเหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะที่หนามากขึ้น หรือการเชื่อมต่อชนแบบที่เกิดประกายไฟและการเชื่อมแบบปุ่มยื่น (Projection welding)

2. แท่งขั้วอิเล็กโทรด กลุ่ม B เป็นกลุ่มที่ผลิตจากวัสดุโลหะที่ทนความร้อนสูง (High heat resistance) โดยมีจุดประสงค์ต้องการที่จะให้อิเล็กโทรดทนการสีกหรือที่อุณหภูมิสูงคู่กับความแข็งแรงสูง แต่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าและความร้อนจะลดลง โดย RWMA ได้จัดแบ่งตามคุณสมบัติเป็นระดับ (Class) ซึ่งตัวเลขระดับมากขึ้นค่าการนำไฟฟ้าและความร้อนจะลดลง ดังรายละเอียดของระดับต่าง ๆ ดังนี้

- แท่งขั้วอิเล็กโทรดระดับ RWMA Class X ผลิตมาจากวัสดุโลหะทองแดง-ทังสเทนผสม (Copper-Tungsten alloy : 45%-50%) หรือมาตรฐาน ASTM ไม่มีระบุ เป็นแท่งขั้วอิเล็กโทรดที่ออกแบบมาใช้สำหรับขบวนการเชื่อมความต้านทาน แบบการเชื่อมวาบ (Flash welding : FW) และแบบการเชื่อมปุ่มยื่น (Projection welding) โดย Class X นี้มีสมบัติที่นำกระแสไฟฟ้าและความร้อนได้ค่อนข้างดี

- แท่งขั้วอิเล็กโทรดระดับ RWMA Class XI ผลิตมาจากวัสดุโลหะทองแดง-ทังสเทนผสม (Copper-Tungsten alloy : 25%-75%) หรือมาตรฐาน ASTM คือ B702C1D อิเล็กโทรดระดับหรือคลาสนี้มีค่าความแข็ง (Hardness) ที่สูงมากกว่า Class X และสามารถเชื่อมงานที่หนากว่า เพราะแท่งอิเล็กโทรดเพิ่มความสามารถในการรับแรงกดขณะเชื่อมได้มากขึ้น

- แท่งขั้วอิเล็กโทรดระดับ RWMA Class XII ผลิตมาจากวัสดุโลหะทองแดง-ทังสเทนผสม (Copper-Tungsten alloy : 20%-80%) หรือมาตรฐาน ASTM คือ B702C1E เป็นแท่งอิเล็กโทรดที่แข็งที่สุดในกลุ่มของทองแดง-ทังสเทนผสม ด้วยเพราะมีความแข็งแรงสูงมาก รับแรงกดได้มาก มีอัตราการสีกหรือที่อุณหภูมิสูงต่ำ จึงเหมาะสมและนิยมใช้กับการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มยื่น (Projection welding)

- แท่งขั้วอิเล็กโทรดระดับ RWMA Class XIII ผลิตมาจากวัสดุโลหะทังสเทน (Tungsten 100%) หรือมาตรฐาน ASTM ไม่มีระบุ เป็นแท่งอิเล็กโทรดที่มีความแข็งแรงสูงมากมีความเหนียวต่ำ นิยม

นำมาใช้กับการเชื่อมเส้นลวดตามแนวขวาง (Cross-wire welding) ของวัสดุจำพวกโลหะทองแดงและทองเหลือง

- แท่งขั้วอิเล็กโทรดระดับ RWMA Class XIV เป็นแท่งขั้วอิเล็กโทรดที่ผลิตมาจากวัสดุโลหะโมลิบดีนัม (Molybdenum 100%) หรือมาตรฐาน ASTM คือ B387 Type 360 เป็นแท่งอิเล็กโทรดที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า Class XIII สามารถใช้กับงานเชื่อมเส้นลวดตามแนวขวาง (Cross-wire welding) ได้เช่นเดียวกัน โดยราคาค่อนข้างถูกกว่าและมีความเหนียวมากกว่า ช่วยลดปัญหาการแตกร้าวของแท่งอิเล็กโทรด

3. แท่งขั้วอิเล็กโทรด กลุ่ม C เป็นกลุ่มที่ผลิตจากวัสดุพิเศษ (Specialty materials) โดยมีจุดประสงค์ต้องการจะนำแท่งอิเล็กโทรดไปใช้เชื่อมโลหะที่มีสภาพผิวเคลือบต่าง ๆ โดย RWMA ได้กำหนดไว้ดังนี้

- แท่งขั้วอิเล็กโทรดระดับ RWMA Class XX หรือมาตรฐาน ASTM คือ C15760 ผลิตมาจากวัสดุโลหะทองแดง-อลูมิเนียม (Copper-Aluminum alloy) ที่ผ่านขบวนการเพิ่มความแข็งแรงด้วยเทคนิควิธีการ Dispersion strengthened กล่าวคือ การใช้อลูมิเนียมออกไซด์กระจายตัวในโลหะหลักทองแดง ด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบโลหะซินเตอร์ (Power metallurgy) โดยแท่งขั้วอิเล็กโทรดจะมีโครงสร้างภายในที่ความหนาแน่นต่ำ ค่าความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าและการนำความร้อนไม่สูงมากนัก นิยมใช้กับกระแสไฟเชื่อมแบบพัลส์ (Pulse current) ในการเชื่อมโลหะที่ผ่านการเคลือบผิว (Galvanized steel) เป็นต้น

ลักษณะรูปร่างของแท่งขั้วอิเล็กโทรด (Shape of electrode)

แท่งขั้วอิเล็กโทรดถึงแม้จะมีหลากหลายชนิดตามความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน แต่เมื่อพิจารณาถึงลักษณะรูปร่างหรือองค์ประกอบของแท่งขั้วอิเล็กโทรดจะพบว่ามีเพียง 2 ลักษณะเท่านั้น คือ

1. ลักษณะรูปร่างที่เป็นแบบแท่งชิ้นเดียว (Massive) เป็นอิเล็กโทรดที่ใช้กันมาแต่ต้นของการขบวนการเชื่อมจุด โดยเป็นเนื้อเดียวกันทั้งแท่งที่รวมทั้งด้ามและปลายของแท่งอิเล็กโทรด เมื่อใช้งานไปนาน ๆ ปลายของแท่งอิเล็กโทรดจะสึกหรองจนไม่สามารถใช้งานได้อีกต้องทิ้งทั้งแท่ง ซึ่งเป็นการสูญเสียเนื้อโลหะบริเวณด้ามที่เหลืออยู่มากอย่างน่าเสียดาย ซึ่งผู้ผลิตได้ออกแบบปลายของแท่งขั้วอิเล็กโทรดที่หลากหลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.40

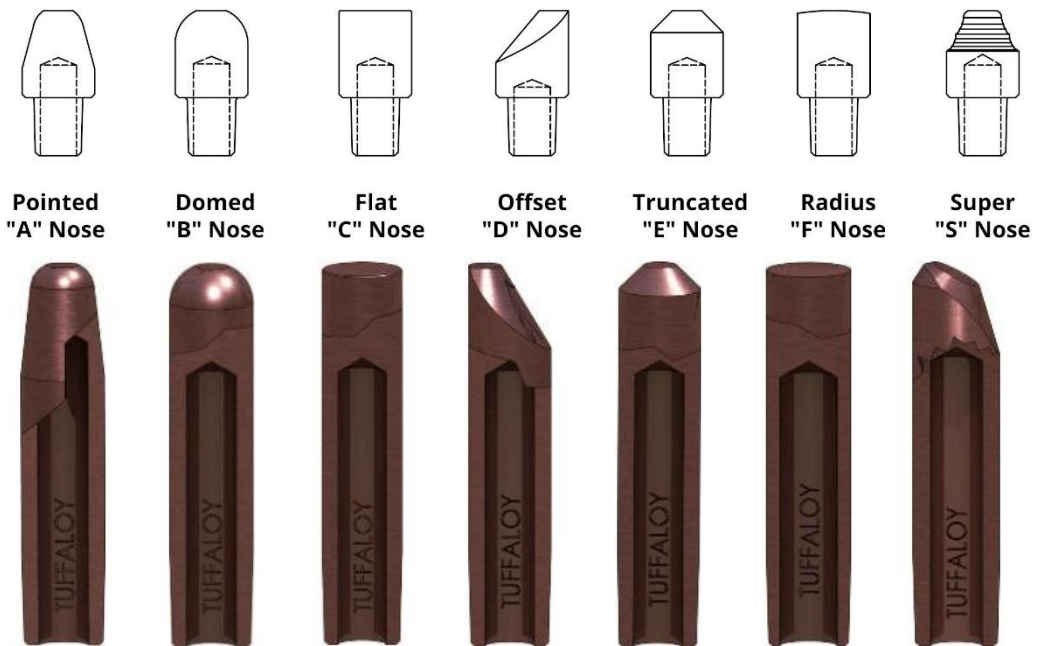
2. ลักษณะรูปร่างที่เป็นแบบแท่งประกอบ (Shank and Cap) เป็นอิเล็กโทรดที่พัฒนาปรับปรุงเพื่อลดการสิ้นเปลืองด้ามอิเล็กโทรด โดยการออกแบบด้าม (Shank) ที่สามารถนำส่วนปลาย (Cap) ของแท่งอิเล็กโทรดหรือที่เรียกกันว่า “หมวก” มาสวมได้เมื่อผ่านการใช้งานไปนาน ๆ หากปลายของแท่งอิเล็กโทรดเกิดการสึกหรอก็สามารถถอดเปลี่ยนเฉพาะส่วนปลายเท่านั้น ซึ่งผู้ผลิตก็ได้ออกแบบปลายสำหรับสวมที่หลายหลายรูปร่างตามลักษณะการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.41 การติดตั้งหรือสวมของปลายแท่งอิเล็กโทรดได้ออกแบบไว้ 2 วิธี คือ วิธีการสวมอัดและวิธีการขันเกลียว



รูปที่ 4.40 มาตรฐานของแท่งอิเล็ก
โทรดแบบแท่งขึ้นเดียว (Massive)

ที่มา : WSI, Weld Systems

Integrators, Inc. Resistance Welding
Products 2019



รูปที่ 4.41 มาตรฐานของแท่งอิเล็กโทรดแบบแท่งประกอบ (Shank and Cap)

ที่มา : WSI, Weld Systems Integrators, Inc. Resistance Welding Products 2019

ข้อควรพิจารณาของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Considered of spot welding)

การเชื่อมความต้านทานแบบจุดถึงแม้จะมีขบวนการที่ไม่ซับซ้อนมากนัก แต่ก็มีสิ่งที่จะต้องพิจารณาซึ่งเป็นคำแนะนำจากผู้ผลิต Miller Electric– Guideline (2018) ได้แก่

1. การที่กระแสไฟฟ้าไม่ไหลผ่านจุดเชื่อม (Shunting effect) เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยมากสำหรับการเชื่อมที่อาศัยความร้อนจากการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า (Resistance welding) ซึ่งเมื่อกระแสไหลผ่านจุดตำแหน่งที่ต้องการเชื่อมน้อย จะทำให้ค่าความต้านทานต่ำลง ส่งผลต่อปริมาณ

ความร้อนที่เกิดขึ้นน้อยเนื้อโลหะหลอมละลายน้อย แนวเชื่อมที่ได้จะมีขนาดเล็กหรืออาจถึงขั้นเชื่อมไม่ติดจากการศึกษาค้นคว้าของผู้เขียนพอจะสรุปสาเหตุของการเกิดหลัก ๆ ดังนี้

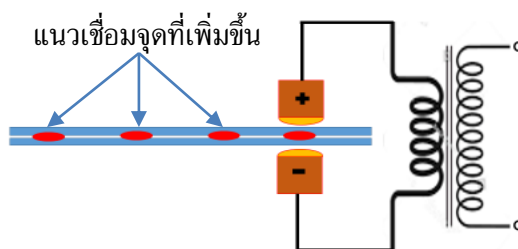
- เกิดจากการเว้นระยะห่างระหว่างจุดแนวเชื่อมแต่ละจุดไม่มากพอ กล่าวคือ โดยปกติการเชื่อมจุดมักออกแบบจุดเชื่อมที่มากจุด ซึ่งถ้าระยะห่างระหว่างจุดน้อยเกินไป จะทำให้กระแสไฟบางส่วนเกิดการไหลไปยังจุดเชื่อมข้างเคียงที่เชื่อมเสร็จแล้วส่งผลให้ปริมาณกระแสที่ต้องการใช้เชื่อมไม่มากเพียงพอ โดยระยะห่างที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับปัจจัยการเชื่อมอื่นร่วมด้วย ดังแสดงระยะห่างที่เหมาะสม (ระยะA) ใน **ตารางที่ 4.10**

- เกิดจากแผ่นโลหะที่ซ้อนเชื่อมมีพื้นที่แนบสนิทติดกันมาก กล่าวคือ การที่แผ่นโลหะที่นำมาเชื่อมเมื่อวางทับซ้อนกัน มีความเรียบและแนบสนิทติดกันเป็นพื้นที่กว้างทำให้กระแสไฟเชื่อมสามารถไหลกระจายไปทั่ว โดยจุดที่ต้องการเชื่อมมีปริมาณกระแสไฟน้อยเกินไปไม่เกิดความหนาแน่นของกระแสที่มากพอที่จะสร้างความต้านทานแล้วเกิดความร้อนขึ้นได้

- กรณีการเชื่อมแบบวิธีทางอ้อม (Indirect spot welding) ปัญหา มักเกิดจากการจัดเรียงความหนาของแผ่นโลหะไม่ถูกต้องอาจทำให้ได้แนวเชื่อมที่เล็กเกินไป และมีความแข็งแรงต่ำ

- ปัญหาจากการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่มีสายไฟฟ้าต่อหรือสัมผัสกับชิ้นงาน หากอุปกรณ์ดังกล่าวมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมอาจรั่วไหลไปยังเครื่องมือวัด แทนที่จะไหลไปยังจุดที่ต้องการเชื่อม

2. การสูญเสียความต้านทานจากการเหนี่ยวนำ (Induction effect) ในขณะที่ทำการเชื่อมความต้านทานของระบบวงจรไฟฟ้าของเครื่องเชื่อมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งความต้านทานของระบบวงจรไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากความต้านทานของโลหะชิ้นงานที่ทำการเชื่อมนั่นเอง ส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าทุติยภูมิ (Secondary current) ของหม้อแปลงเครื่องเชื่อมลดลง กระแสไฟเชื่อมที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานก็น้อยลง แนวเชื่อมจึงมีขนาดเล็กและเมื่อเชื่อมจำนวนจุดที่เพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานของระบบวงจรไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงใน **รูปที่ 4.42**

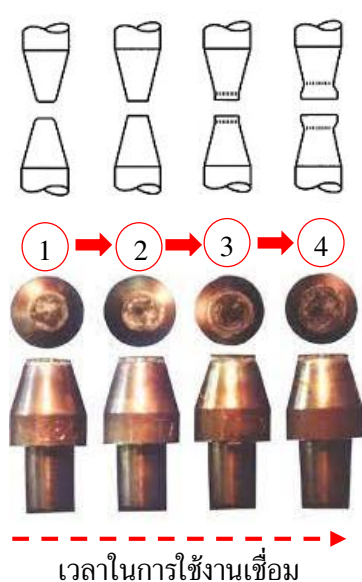


รูปที่ 4.42 ลักษณะของการสูญเสียความต้านทานเมื่อจำนวนจุดเชื่อมที่เพิ่มขึ้น

ที่มา : วิชาญ ช่วยพันธ์ เอกสารประกอบการสอน วิชาเทคโนโลยีงานเชื่อม 2562

3. ความเสียหายของแท่งขั้วอิเล็กโทรด (Electrode effected) เป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงเสียหายของปลายแท่งขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดขึ้นหลังจากการนำไปใช้งาน ซึ่งสามารถพบเห็นความเสียหายนี้บ่อย ๆ จึงเป็นเหตุที่ทำให้ต้องระมัดระวังเพื่อยืดอายุการใช้งานของแท่งขั้วอิเล็กโทรด โดยเกิดได้ในลักษณะดังนี้

- เกิดจากแรงกดแท่งขั้วอิเล็กโทรดขณะเชื่อม (Force effected) เป็นความเสียหายของแท่งขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดจากแรงกดเชื่อมจะพบเห็นเสมอและสามารถเกิดได้กับการเชื่อมทุกชนิดของโลหะแผ่นที่นำมาเชื่อม โดยจะเกิดกับเมื่อแท่งอิเล็กโทรดได้ผ่านการใช้งานมาเป็นเวลานาน ซึ่งปลายของแท่งอิเล็กโทรดจะเสียรูปบานออกเรื่อย ๆ จนทำให้ขนาดของปลายแท่งอิเล็กโทรดโตเกินขนาดของจริง ซึ่งปัจจัยที่ส่งเสริมให้เกิดการเสียรูปบานออกได้ง่าย คือ ความร้อนที่เกิดการเชื่อม (Heating welding) และแรงกดขณะเชื่อม (Force welding) ดังแสดงในรูปที่ 4.43 โดย หมายเลข 1 จะเริ่มเสียรูปบานออกและเมื่อใช้งานมากขึ้นอัตราการเสียรูปจะเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ 2 → 3 → 4 จนไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไปจึงต้องทำการเปลี่ยนแท่งขั้วอิเล็กโทรดแท่งใหม่แทน



รูปที่ 4.43 การสึกหรอของแท่งขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดจากแรงกดขณะเชื่อม

ที่มา : วิชาญ ช่วยพันธ์ เอกสารประกอบการสอน วิชาเทคโนโลยีงานเชื่อม 2562

- เกิดจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของปลายแท่งขั้วอิเล็กโทรด (Properties of electrode effected) เป็นความเสียหายที่เกิดจากคุณสมบัติที่ปลายของแท่งขั้วอิเล็กโทรดเปลี่ยนไป กล่าวคือ โดยปกติการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ถ้าเชื่อมบนโลหะแผ่นเหล็กที่ไม่มีการเคลือบผิว (Non-coating sheet) แท่งขั้วอิเล็กโทรดจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าการเชื่อมโลหะแผ่นเหล็กที่เคลือบด้วยโลหะสังกะสี (Galvanized sheet) เหตุผลเพราะความร้อนจากการเชื่อมจะทำโลหะสังกะสีที่เคลือบผิวอยู่ละลายออกมาติดกับปลายแท่งขั้วอิเล็กโทรด เมื่อเกาะติดอยู่ในปริมาณที่มากขึ้นความร้อนในการเชื่อมแต่ละครั้งจะทำให้โลหะสังกะสีสามารถแพร่ซึม (Diffusion) เข้ามารวมตัวกับโลหะทองแดงที่ปลายของ

แท่งขั้วอิเล็กโทรดได้ ส่งผลทำให้ปลายของแท่งอิเล็กโทรดกลายเป็นโลหะทองแดงผสม (Copper + Zinc) ที่เรียกว่า “ทองเหลือง (Brass)” ซึ่งมีคุณสมบัติที่เปราะและสร้างความร้อนได้ลดลง ดังนั้น เมื่อทำการเชื่อมก็จะต้องใช้แรงกดที่มากขึ้นและใช้กระแสที่สูงขึ้นพร้อมกับเวลาในการเชื่อมที่นานมากขึ้น จากผลดังกล่าว ให้เกิดการเสียรูปบานออกของปลายแท่งขั้วอิเล็กโทรดที่มีลักษณะรูปร่างคล้ายกับดอกเห็ด จึงเรียกความเสียหายแบบนี้ว่า “Electrode mushrooming” ดังแสดงในรูปที่ 4.44

สภาพปลายปกติ สภาพปลายบานออก รูปที่ 4.44 สภาพของแท่งขั้วอิเล็กโทรดที่ปกติ กับ



สภาพเสียรูปบานออกคล้ายดอกเห็ด

ที่มา : SWANTEC Software and Engineering Aps, 2018

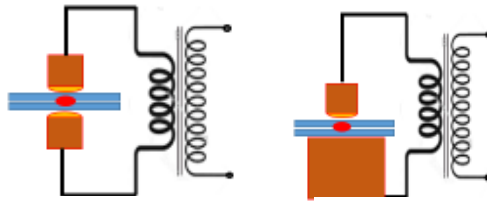
ประเภทของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Type of spot welding)

เทคนิคหรือวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ได้ประยุกต์ออกแบบไว้หลากหลายจากบนพื้นฐานของขีดจำกัดของการเชื่อมซึ่งที่พบเห็นกันบ่อย ๆ พอจะแยกออกได้ดังนี้ โดยอ้างอิงข้อมูลที่เคยแพร่ในเอกสารการปฏิบัติงานของ ENTRON Controls LLC (2014)

1. วิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ชนิดโดยตรง (Direct spot welding) ซึ่งเป็นเทคนิคหรือวิธีการพื้นฐานของการเชื่อมจุดโดยแท่งขั้วอิเล็กโทรด 2 แท่งกดแผ่นโลหะชิ้นงานจากด้านตรงข้ามเพื่อให้กระแสไหลผ่านความต้านทานแล้วเกิดความร้อนที่รอยต่อแล้วหลอมละลายติดกันเป็นแนวเชื่อม (Nugget) ดังแสดงในรูปที่ 4.45 (ก)

2. วิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ชนิดโดยอ้อม (Indirect spot welding) ซึ่งเป็นเทคนิคหรือวิธีการเชื่อมที่ใช้ในกรณีที่ปลายของแท่งขั้วอิเล็กโทรดไม่สามารถวางให้อยู่ในตำแหน่งตรงกันข้ามได้ เช่น กรณีที่ชิ้นงานเชื่อมมีขนาดใหญ่มาก ไม่สามารถนำป้อนเข้ามาในระยะห่างระหว่างขั้วของแท่งอิเล็กโทรดได้ จึงได้ออกแบบสร้างแท่งก้อนโลหะทองแดง (Copper bar) เป็นแท่งขั้วอิเล็กโทรดขึ้นในตำแหน่งฝั่งตรงข้ามไว้เพื่อรองรับโลหะงานที่จะเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.45 (ข)

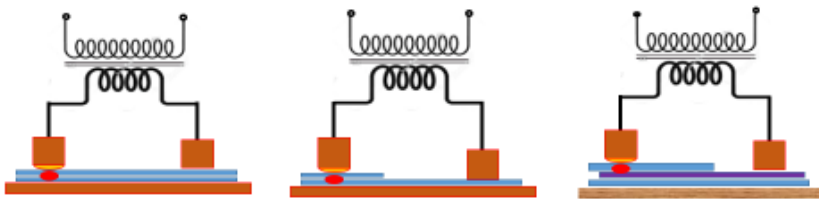
3. วิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดกดและดึง (Push-Pull spot welding) เป็นเทคนิคการเชื่อมจุดที่เป็นลักษณะของการเชื่อมอยู่ในรูปแบบชนิดโดยตรง ที่มีแท่งขั้วอิเล็กโทรด 2 แท่ง กดลงบนแผ่นชิ้นงานเชื่อมเป็นแบบอนุกรมที่มีกรัดและดึง ซึ่งสามารถเชื่อมได้มากกว่าหนึ่งจุดในเวลาเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.45 (ค)



แบบ A

แบบ B

(ก) การเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดโดยตรง (Direct spot welding)

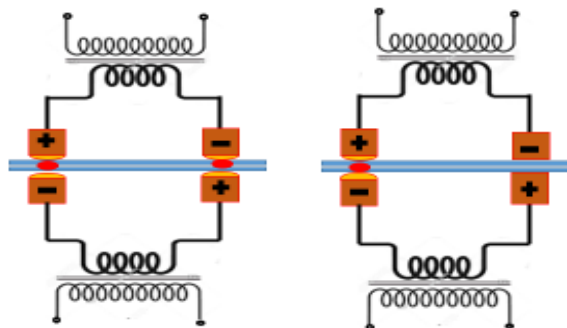


แบบ A

แบบ B

แบบ C

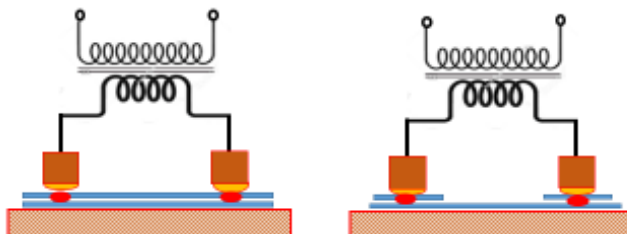
(ข) การเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดโดยอ้อม (Indirect spot welding)



แบบ A

แบบ B

(ค) การเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดกดและดึง (Phus-Pull spot welding)



แบบ A

แบบ B

(ง) การเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดอนุกรม (Series spot welding)

รูปที่ 4.45 ประเภทของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Type of spot welding)

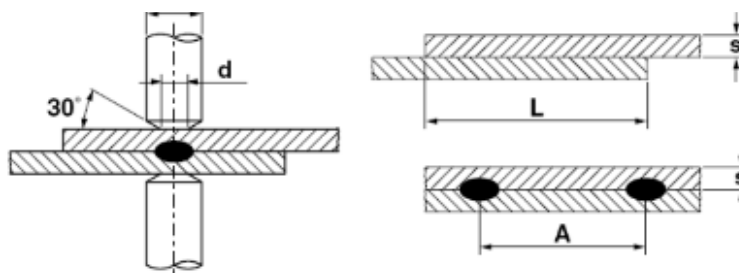
ที่มา : HOW To Resistance Weld, 2012 (เขียนใหม่)

4. วิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดอนุกรม (Series spot welding) เป็นเทคนิคการเชื่อมจุดที่เป็นลักษณะของการเชื่อมที่อยู่ในรูปแบบชนิดโดยอ้อมที่มีแท่งขั้วอิเล็กโทรด 1 แท่ง (Electrode rod) ทำหน้าที่กดลงบนแผ่นชิ้นงาน และอีกขั้วอิเล็กโทรดเป็นแท่งก้อนโลหะทองแดง อีก 1 แท่งก้อน ซึ่งทำหน้าที่รองรับแผ่นชิ้นงานที่จะเชื่อม (Electrode bar) โดยเป็นแบบอนุกรมที่มีตำแหน่งที่จะเชื่อมได้มากกว่าหนึ่งจุดในเวลาเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.45 (ง)

จากเทคนิคหรือวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุดแต่ละชนิดของการออกแบบการเชื่อมที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ข่างเชื่อมหรือวิศวกรการเชื่อมต้องพิจารณาถึงความหนาของแผ่นโลหะที่ต้องการจะเชื่อม (Base metals) โดยต้องสัมพันธ์กันกับปัจจัยและเงื่อนไขของการเชื่อมจุด ดังแสดงเป็นตัวอย่างที่ความหนาของโลหะแผ่นงานบางขนาดในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ปัจจัยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่สัมพันธ์กับความหนาของโลหะเชื่อม

ที่มา : SIAM PART PRODUCTS, Spot Welding Level 2 for Technicians 2014



| S (mm) | d (mm) | $D \geq$ (mm) | A (min) | L (min) | เวลาเชื่อม (Periods) | แรงกด (daN) | กระแส เชื่อม (A) | ขนาดแนว เชื่อม (mm) |
|-----------|-----------|------------------|------------|------------|-------------------------|----------------|---------------------|------------------------|
| 0.25 | 4 | 10 | 6.5 | 10 | 3 | 91 | 4000 | 3.3 |
| 0.5 | 5 | 10 | 10 | 11 | 5 | 136 | 6100 | 4.3 |
| 0.75 | 6 | 13 | 13 | 12 | 6 | 181 | 8000 | 5.3 |
| 1 | 6.5 | 13 | 19 | 13 | 9 | 227 | 9200 | 5.8 |
| 1.25 | 6.5 | 13 | 22 | 14 | 10 | 295 | 10300 | 6.3 |
| 1.5 | 6.5 | 13 | 27 | 16 | 12 | 362 | 11600 | 6.9 |
| 2 | 8 | 16 | 35 | 17 | 18 | 496 | 13300 | 7.9 |
| 2.5 | 8 | 16 | 41 | 19 | 21 | 590 | 14700 | 8.6 |
| 3 | 10 | 16 | 50.8 | 22 | 25 | 815 | 17500 | 10.2 |

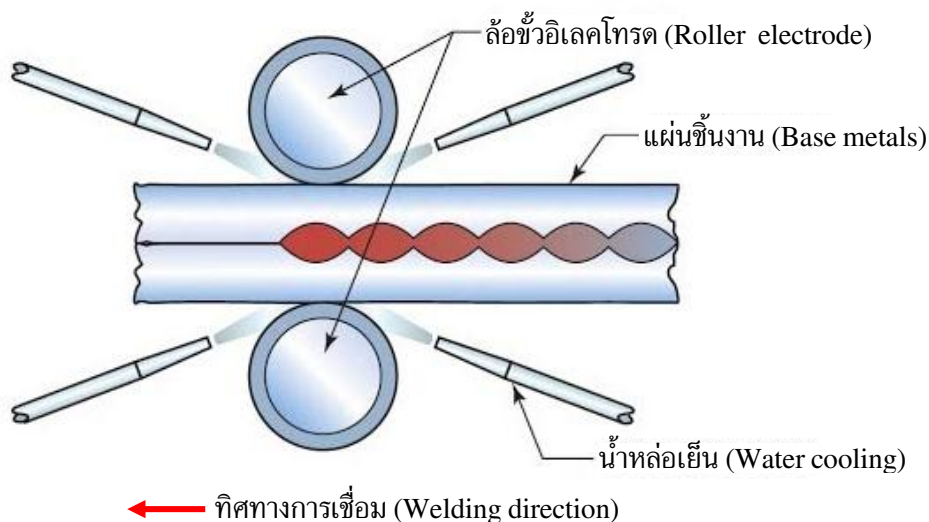
* ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางแนวเชื่อม ถึงขอบของระยะห่างระหว่างแนวต่ำสุด = $2-2.5 \times \phi$ แนวเชื่อม

* ระยะห่างแนวเชื่อม ถึงแนวเชื่อมต่ำสุด = $10 \times$ ความหนาของชิ้นงาน

4.3.2 การเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน (Resistance seam welding)

ก. หลักการของการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน

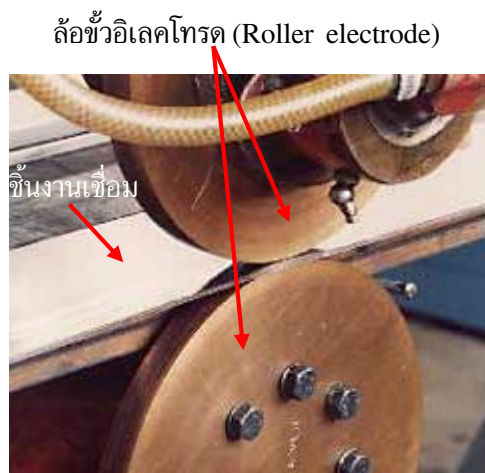
Larry Jeffus (2011) ได้กล่าวถึงหลักของการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทานของกระแสไฟฟ้าว่า เป็นขบวนการเชื่อมพิเศษเฉพาะที่ต้องการเชื่อมโลหะแผ่นให้ติดกันเป็นแนวเชื่อมยาวแบบตะเข็บ ซึ่งมีหลักของการเชื่อมที่คล้ายกับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ต่างกันที่การเชื่อมแบบจุดจะมีแนวเชื่อม (Weld nugget) ท่างกันเป็นช่วง ๆ ส่วนการเชื่อมแบบตะเข็บจะเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous weld nugget) โดยขั้วของอิเล็กโทรดมีลักษณะเป็นล้อกลม (Roller electrode) 2 ขั้ว ล้อที่ทำจากโลหะทองแดงจะทำหน้าที่หมุนและกดลงบนผิวของโลหะชิ้นงานเชื่อมตลอดเวลาขณะเชื่อม และจะมีระบบน้ำหล่อเย็นที่ต้องการระบายความร้อนที่ล้อของขั้วอิเล็กโทรดโดยตรง ดังแสดงระบบของขบวนการเชื่อมในรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 ระบบของการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน (Resistance seam welding)

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding Principles and Applications*, 2004.

โดยปกติแล้วแนวเชื่อมแบบตะเข็บมีความแข็งแรงต่ำกว่าการเชื่อมต่อชน เหตุผลเพราะแนวเชื่อมแบบตะเข็บเป็นแนวเชื่อมเกยที่รับแรงในแนวเฉือน และยังมีลักษณะเหมือนกับมีรอยบากโดยรอบแนวเชื่อม ดังนั้น จึงมักนิยมเลือกใช้กันมากกับงานเชื่อมต่อเป็นภาชนะบรรจุภัณฑ์และผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ป้องกันอากาศหรือไอระเหยต่าง ๆ รั่วไหลออกจากภาชนะบรรจุ เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างการเชื่อมตะเข็บของชิ้นงานที่แนวตะเข็บเล็ก ๆ บนโลหะแผ่นบางกับแนวเชื่อมตะเข็บที่ใหญ่ ๆ บนโลหะแผ่นหนาในรูปที่ 4.47 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยล้อหมุนที่ทำหน้าที่เป็นขั้วอิเล็กโทรดจะออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะของงานที่จะเชื่อม และขนาดของล้อก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามความหนาของชิ้นงานโลหะที่เชื่อม ซึ่งโลหะแผ่นที่หนาต้องใช้ล้อหมุนที่มีขนาดใหญ่ เพราะนอกจากจะให้ความร้อนได้สูงแล้วนั้นยังช่วยเป็นแรงกดลงบนแนวเชื่อมให้โลหะแผ่นเชื่อมติดกันได้ดีมากขึ้นด้วย



(ก) การเชื่อมตะเข็บโลหะแผ่นบาง

(ข) การเชื่อมตะเข็บโลหะแผ่นหนา

รูปที่ 4.47 ตัวอย่างของการเชื่อมตะเข็บด้วยความดันที่ขนาดโลหะแผ่นหนาต่างกัน

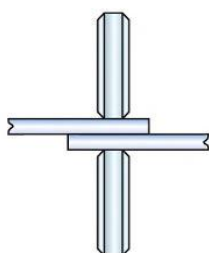
ที่มา : Ammar AM. et. al., *Diyala Journal of Eng. Scie.*, Vol. 07, No. 03, pp. 80-91, 2014.

การออกแบบชนิดรอยต่อสำหรับการเชื่อมตะเข็บด้วยความดันนั้น มี 3 แบบ คือ

1. แบบต่อเกลยแบบ Lap seam เป็นการต่อเกลยที่เหมือนกับการเชื่อมความดันแบบจุด แตกต่างที่แนวเชื่อมเกิดจากอิเล็กโทรดที่เป็นลักษณะล้อกลมหมุน ดังแสดงลักษณะการต่อเกลยในรูปที่ 4.48 (ก)

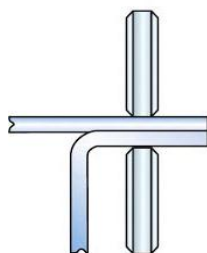
2. แบบต่อเกลยแบบ Flanged seam เป็นการต่อเกลยตะเข็บปึกเพื่อใช้เป็นขอบหรือบ่าของภาชนะบรรจุ ดังแสดงลักษณะการต่อเกลยในรูปที่ 4.48 (ข)

3. แบบต่อเกลยแบบ Mashed seam เป็นลักษณะการต่อเกลยที่มีระยะการเกยน้อยกว่าการเกยแบบปกติ โดยระยะเกยจะอยู่ที่ 1-1.5 เท่าของความหนาโลหะแผ่นงาน หลังจากเชื่อมแล้วตรงบริเวณแนวเชื่อมจะมีความหนาที่มากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความกว้างของผิวหน้าของล้อหมุนอิเล็กโทรดที่ออกแบบให้แบนราบ ซึ่งสามารถควบคุมขนาดของรอยต่อได้ ดังแสดงลักษณะการต่อเกลยในรูปที่ 4.48 (ค)



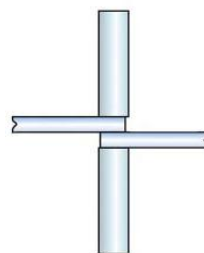
(ก)

การต่อแบบ Lap seam



(ข)

การต่อแบบ Flanged seam



(ค)

การต่อแบบ Mashed seam

รูปที่ 4.48 ชนิดของการต่อเกลยสำหรับการเชื่อมตะเข็บด้วยความดัน

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding Principles and Applications*, 2004.

นอกจากจะเลือกชนิดของแนวตะเข็บเชื่อมที่เหมาะสมกับลักษณะของงานแล้วนั้น ขณะทำการเชื่อมช่างเชื่อมต้องควบคุมระดับแรงกดและปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วล่ออิเล็กโทรดตลอดเวลา รวมไปถึงความเร็วเชื่อม ระยะเกย และความหนาของรอยต่อที่ต้องมีความสัมพันธ์กัน ดังแสดงเป็นตัวอย่างความสัมพันธ์ของปัจจัยการเชื่อมต่อความหนาของชิ้นงานโลหะเชื่อมในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ปัจจัยการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทานที่สัมพันธ์กับความหนาของโลหะเชื่อม

ที่มา : Resistance Welding Manual, Resistance Welder Manufacturers, Association Alliance 2003

| วัสดุโลหะชิ้นงานเชื่อม | | ความเร็วเชื่อม | เวลาเชื่อม (Cycles) | | แรงกดอิเล็กโทรดแต่ละปุ่มยื่น (Ids) | กระแสไฟเชื่อม (A) |
|------------------------|--------------|----------------|---------------------|------|------------------------------------|-------------------|
| แผ่นบาง (in) | แผ่นหนา (in) | (in/min) | Heat | Cool | | |
| 0.031 | 0.078 | 75 | 3 | 2 | 600 | 16,000 |
| 0.031 | 0.078 | 142 | 2 | 1 | 800 | 22,000 |
| 0.031 | 0.050 | 72 | 3 | 2 | 800 | 17,000 |
| 0.031 | 0.050 | 142 | 2 | 1 | 700 | 20,000 |
| 0.050 | 0.078 | 60 | 4 | 3 | 1,200 | 22,000 |
| 0.050 | 0.078 | 120 | 3 | 1 | 1,200 | 20,000 |

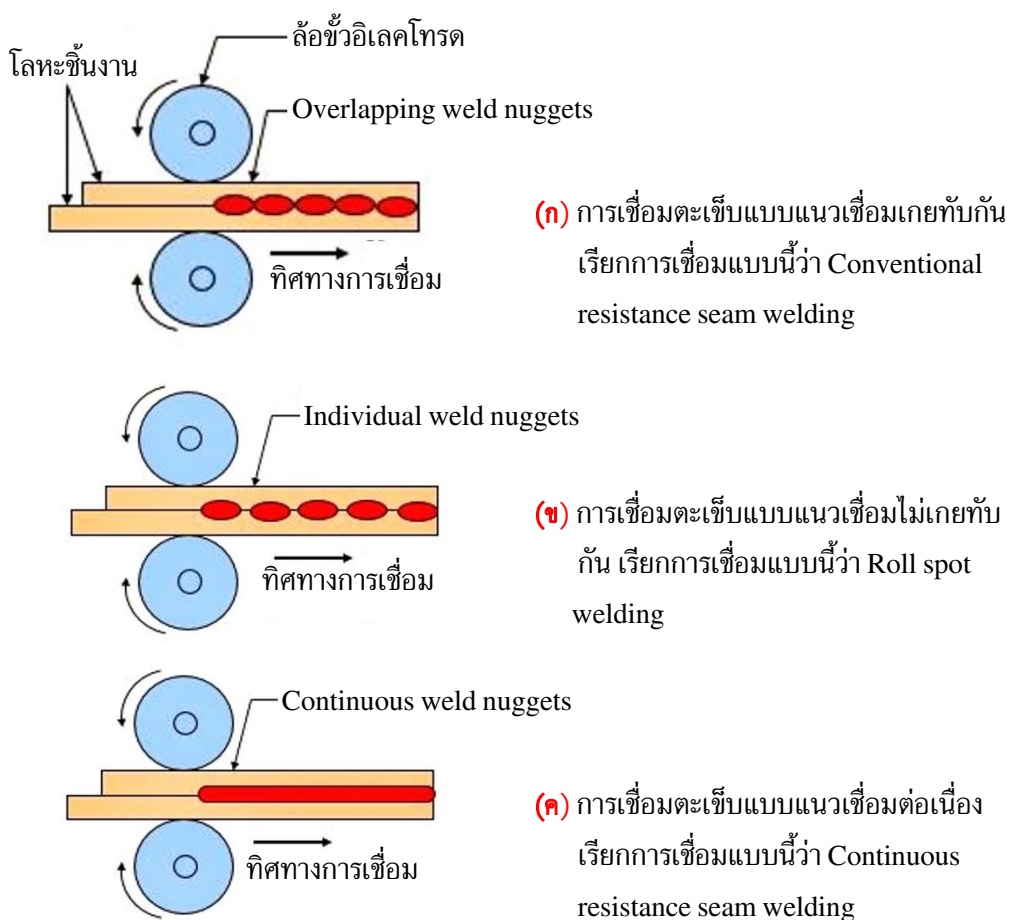
โดยชิ้นงานโลหะที่ต้องการเชื่อมจะอยู่ระหว่างขั้วล่ออิเล็กโทรดที่หมุนไปในทิศทางการเชื่อม ซึ่งมีการปล่อยกระแสไฟฟ้าเชื่อมไหลผ่านตลอดเวลาและผ่านระบบควบคุมเปิด-ปิด (On-Off) กระแสไฟฟ้าเชื่อมที่ไหลผ่านโลหะชิ้นงานโดยถูกควบคุมให้ เปิด-ปิดไหลตามซ้ำ ๆ กันไปอย่างรวดเร็ว ขณะเปิดกระแสไฟฟ้าเชื่อมจะไหลผ่านทำให้เกิดความต้านทานและเกิดการเชื่อม ขณะปิดไม่มีกระแสไฟฟ้าก็ไม่เกิดการเชื่อม ดังนั้น การควบคุมการเปิด-ปิดกระแสไฟฟ้าเชื่อมจึงสามารถควบคุมลักษณะของแนวเชื่อมตะเข็บได้ว่าการในลักษณะตะเข็บเชื่อมแบบใด ซึ่งในทางปฏิบัติจะมีระบบควบคุมการเปิด-ปิดแบบอัตโนมัติ โดยเฉพาะในระบบการเชื่อมในสายระบบการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งพบว่า ลักษณะของแนวเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทานมี 3 ลักษณะ ดังนี้

1. ลักษณะแนวเชื่อมตะเข็บแบบแนวเชื่อมเกยทับกัน (Overlap weldment) โดยลักษณะของแนวเชื่อมตะเข็บแต่ละจุด (Spot) มีเกยซ้อนทับกันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจัดว่าเป็นลักษณะของแนวเชื่อมตะเข็บปกตินิยมที่ใช้งานกันมาก มักเรียกการเชื่อมแบบนี้ว่า Conventional resistance seam welding ดังแสดงลักษณะของแนวเชื่อมตะเข็บในรูปที่ 4.49 (ก)

2. ลักษณะแนวเชื่อมตะเข็บแบบแนวเชื่อมไม่เกยทับกัน (Individual weldment) โดยลักษณะของแนวเชื่อมตะเข็บจะเป็นแนวเชื่อมที่เป็นจุดเชื่อม (Nugget) แต่ละจุดไม่มีส่วนที่ซ้อนทับกัน จะแยกห่างออกจากกันเป็นช่วง ๆ อย่างต่อเนื่อง มักเรียกการเชื่อมแบบนี้ว่า Roll spot welding ดังแสดง

ลักษณะของแนวเชื่อมตะเข็บในรูปที่ 4.49 (ข)

3. ลักษณะแนวเชื่อมตะเข็บแบบแนวเชื่อมต่อเนื่อง (Continuous weldment) โดยลักษณะของแนวเชื่อมจะหลอมเป็นแนวตะเข็บเชื่อมอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งแนว คล้ายกับการเชื่อมแบบหลอมละลายของวิธีเชื่อมอื่น ๆ ซึ่งแตกต่างจากสองลักษณะที่กล่าวมาข้างต้น จะเป็นแนวเชื่อมตะเข็บที่มีความแข็งแรงสูงเหมาะกับการเชื่อมตะเข็บของภาชนะความดันหรือภาชนะที่ต้องการป้องกันการรั่วไหล มักจะเรียกการเชื่อมแบบนี้ว่า Continuous resistance seam welding ดังแสดงลักษณะของแนวเชื่อมตะเข็บในรูปที่ 4.49 (ค) ที่อ้างอิงจาก Larry Jeffus (2004)



รูปที่ 4.49 ลักษณะของรอยเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน

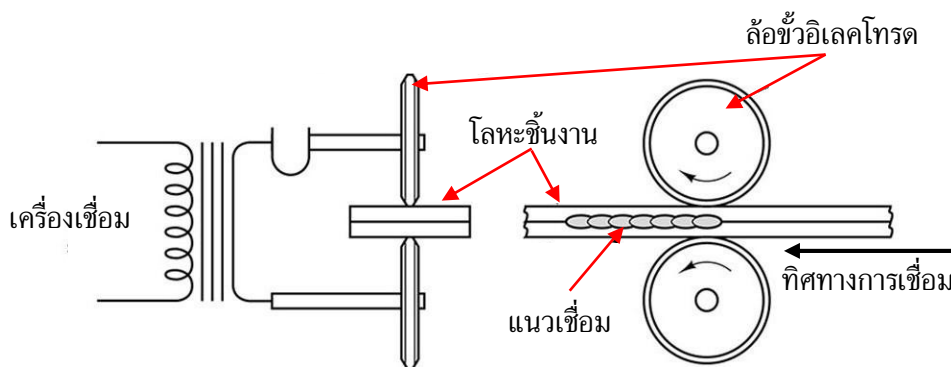
ที่มา : Larry Jeffus, *Welding Principles and Applications*, 2004.

ข. องค์ประกอบของเครื่องเชื่อมสำหรับการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน (Welding machine)

Westermans International Ltd. (2013) ได้เผยแพร่ข้อมูลในวารสารว่าการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทานมีระบบหลักการเชื่อมที่อาศัยความร้อนจากความต้านทานกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ดังนั้น องค์ประกอบหลักที่สำคัญของการเชื่อมจึงเหมือนกัน จะต่างกันที่รูปแบบของขั้วอิเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 4.50 โดยทั่วไปพบว่าเครื่องเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทานจะมีรูปร่างของเครื่องเชื่อมที่หลากหลาย ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ต้องการเชื่อมเพื่อสร้างความสะดวกหรืออาจลดข้อจำกัดของการเชื่อม แต่ยังคงอาศัยหลักการพื้นฐานของความต้านทานกระแสไฟฟ้าที่เหมือนกัน ซึ่งที่พบเห็นบ่อย สามารถแยกได้ 2 ประเภท คือ

1. เครื่องเชื่อมตะเข็บแบบเชื่อมด้วยคน (Manual seam welding machine) เหมาะกับงานเชื่อมโลหะแผ่นบาง มีการออกแบบล้อขั้วอิเล็กโทรดที่หลากหลายขนาดตามความเหมาะสม ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องเชื่อมในรูปที่ 4.51 (ก) เครื่องเชื่อมลักษณะแบบนี้มีพบเห็นอยู่ทั่วไปกับโรงงานประกอบงานเชื่อมขนาดเล็กหรือปานกลาง ที่ใช้เชื่อมโลหะแผ่นของงานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมากนัก ที่สำคัญคือ มีระบบการใช้งานของเครื่องไม่ซับซ้อนเพราะสั่งการทำงานของเครื่องด้วยคนที่เชื่อม

2. เครื่องเชื่อมตะเข็บแบบเชื่อมด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic seam welding machine) เครื่องเชื่อมประเภทนี้จะพบเห็นในระบบการผลิตอย่างต่อเนื่องของสายการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ถึงบรรจุน้ำมัน เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องเชื่อมในรูปที่ 4.51(ข) เครื่องเชื่อมประเภทนี้มีขีดความสามารถในการเชื่อมที่สูง สามารถเชื่อมตะเข็บบนโลหะแผ่นที่มีความหนามากกว่าแบบแรกทีกล่าวมา ใช้ระบบสั่งการทำงานผ่านโปรแกรมสั่งงานบนคอมพิวเตอร์ควบคุม สามารถปฏิบัติการเชื่อมได้แบบอัตโนมัติ และทำการเชื่อมได้ติดต่อกันเป็นเวลานาน ๆ ได้ดี เป็นเครื่องเชื่อมที่ติดตั้งไว้บนเครื่องจักรที่มีระบบกลไกจับยึดและป้อนชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมได้ด้วยตัวของเครื่องจักร เครื่องเชื่อมลักษณะนี้มีราคาแพงและมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.50 องค์ประกอบของการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding Principles and Applications*, 2004.



(ก) เครื่องเชื่อมตะเข็บแบบเชื่อมด้วยคน
(Manual seam welding machine)



(ข) เครื่องเชื่อมตะเข็บด้วยระบบควบคุม
อัตโนมัติ (Automatic seam welding
machine)

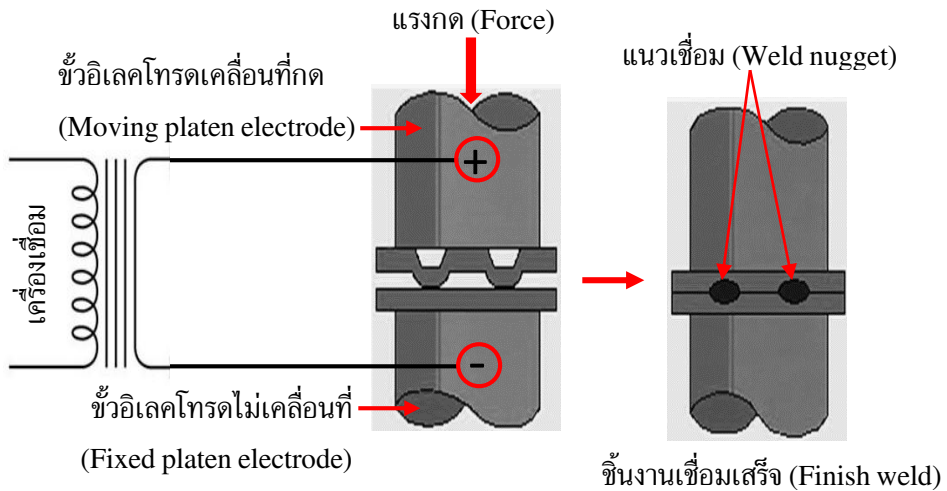
รูปที่ 4.51 ตัวอย่างเครื่องเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน

ที่มา : Guangzhou Duowelder Limited, 2016.

4.3.3 การเชื่อมป้อนด้วยความต้านทาน (Resistance projection welding)

ก. หลักการของการเชื่อมป้อนด้วยความต้านทาน

RWMA (2003) ได้กล่าวถึงการเชื่อมป้อน (อาจเป็นรอยนูน/รอยบุ๋ม) หรือการเชื่อมประกอบชิ้นส่วนที่ผ่านการขึ้นรูปมาแล้วด้วยความต้านทานของกระแสไฟฟ้า เป็นขบวนการเชื่อมที่อาศัยหลักการของความต้านทานเหมือนกับการเชื่อมจุด (Spot welding) จะต่างกันที่หนึ่งในสองชิ้นของโลหะชิ้นงานที่ทำการเชื่อมจะต้องผ่านขบวนการขึ้นรูปเพื่อสร้างรอยนูนหรืออาจเป็นรอยบุ๋มตามรูปร่างและขนาดที่ต้องการ จากนั้นก็นำโลหะงานทั้งคู่มาวางบนขั้วอิเล็กโทรดแบบแผ่นแบนเรียบของเครื่องเชื่อมด้านขั้วอิเล็กโทรดไม่เคลื่อนที่ (Fixed platen electrode) ต่อด้วยการใช้แรงกดลงบนโลหะชิ้นงานที่จะเชื่อมเพื่อให้ติดกันพร้อมทั้งปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จนเกิดร้อนจากความต้านทานขึ้นตรงรอยป้อนหรือรอยนูนหรือรอยบุ๋ม และจะอ่อนตัวหลอมละลายติดกัน ซึ่งในขณะเดียวกันแรงกดของขั้วอิเล็กโทรดเคลื่อนที่ (Moving platen electrode) กดให้ส่วนที่หลอมละลายติดกันแน่นและแบนเรียบมากยิ่งขึ้นจนเกิดเป็นแนวเชื่อม (Weld nugget) ที่สมบูรณ์ ดังแสดงองค์ประกอบของการเชื่อมป้อนในรูปที่ 4.52 การเชื่อมด้วยกรรมวิธีนี้ไม่ต้องการอิเล็กโทรดที่มีรูปร่างซับซ้อน เพราะต้องการให้แผ่นขั้วอิเล็กโทรด (Platens electrode) แนบชิดกับผิวโลหะชิ้นงานเป็นสำคัญ



รูปที่ 4.52 หลักการของระบบการเชื่อมป้อนด้วยความต้านทาน

ที่มา : Osborn Summers, *Projection welding*, 2016. (เขียนใหม่)

ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมของกรรมวิธีนี้ โดยอ้างอิงจาก RWMA (2003) ได้แก่

1. ความหนาของโลหะชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม (Thickness of base metals) โดยชิ้นงานที่หนา มากขึ้นจะต้องใช้กระแสไฟเชื่อม (Welding current) เวลาเชื่อม (Weld cycle time) และแรงกดของ แผ่นอิเล็กโทรดที่สูงขึ้นตามความหนา ดังตัวอย่างแสดงเปรียบเทียบที่ความหนาของโลหะชิ้นงานต่างกัน ใน **ตารางที่ 4.12**
2. ขนาดของป้อนยื่น/รอยนูน/รอยปุ่ม (Projections) ของชิ้นงานที่จะเชื่อมมีผลต่อการกำหนด ปัจจัยของการเชื่อมค่อนข้างมาก ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดความโต (Diameter of projection) และความสูง (Height of projection) ของป้อนยื่น ดังแสดงใน **ตารางที่ 4.12**
3. จำนวนตำแหน่งป้อนยื่น/รอยนูน/รอยปุ่ม (Projections) ของชิ้นงานที่จะเชื่อม มีความสำคัญที่ ต้องพิจารณาอย่างละเอียด เพราะแนวโน้มต่อปัจจัยการเชื่อมด้านต่าง ๆ จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อจำนวนป้อนยื่น ที่มากขึ้น ดังแสดงเปรียบเทียบปัจจัยการเชื่อมของการเชื่อมชิ้นงานที่มีจำนวนป้อนยื่น 2 หรือ 3 กับ 4 หรือ มากกว่า ดังแสดงใน **ตารางที่ 4.13 และ 4.14** ตามลำดับ
4. ชนิดของวัสดุ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าวัสดุโลหะที่จะเชื่อมแต่ละชนิดมีสมบัติต่อความสามารถ ในการเชื่อมแตกต่างกัน โดยเฉพาะจุดหลอมเหลวของวัสดุโลหะนั้น ๆ ดังนั้น ปัจจัยการเชื่อมต้องมีการ ปรับเปลี่ยนไปตามความเหมาะสมของวัสดุโลหะที่จะเชื่อมแต่ละชนิด โลหะที่นิยมเชื่อมกันได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสมและโลหะนิกเกิล เป็นต้น

ตารางที่ 4.12 ปัจจัยการเชื่อมป้อนด้วยความต้านทานที่สัมพันธ์กับความหนาของโลหะเชื่อม

ที่มา : Resistance Welding Manual, Resistance Welder Manufacturers, Association Alliance, 2003

| วัสดุโลหะชิ้นงานเชื่อม | ขนาดของป้อน | | ความสูงของ ป้อน (in) | แรงกดอิเล็ก โทรด (Ids) | เวลาเชื่อม (Cycles) | กระแสไฟ เชื่อม (kA) |
|------------------------|-------------|--------------|-------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| | เกรต | ความหนา (mm) | ยี่น (in) | | | |
| 21 | | 0.033/0.84 | 0.110 | 240 | 3 | 6.6 |
| 19 | | 0.042/1.07 | 0.110 | 330 | 5 | 8.0 |
| 18 | | 0.048/1.22 | 0.140 | 400 | 8 | 8.8 |
| 16 | | 0.060/1.52 | 0.150 | 550 | 10 | 10.3 |
| 14 | | 0.075/1.91 | 0.180 | 800 | 14 | NA |
| 13 | | 0.090/2.29 | 0.210 | 1,020 | 16 | 13.15 |
| 12 | | 0.105/2.67 | 0.240 | 1,250 | 19 | 14.10 |

ตารางที่ 4.13 ปัจจัยการเชื่อมป้อนจำนวน 2 หรือ 3 ป้อนที่สัมพันธ์กับความหนาของโลหะเชื่อม

ที่มา : Resistance Welding Manual, Resistance Welder Manufacturers, Association Alliance, 2003

| วัสดุโลหะชิ้นงานเชื่อม | | เวลาเชื่อม (Cycles) | แรงกดอิเล็กโทรดแต่ละ ป้อน (Ids) | กระแสไฟเชื่อม (kA) |
|------------------------|--------------|------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| เกรต | ความหนา (mm) | | | |
| 25 | 0.021/0.53 | 6 | 150 | 3.85 |
| 23 | 0.027/0.69 | 6 | 150 | 4.45 |
| 21 | 0.033/0.84 | 6 | 150 | 5.1 |
| 19 | 0.042/1.07 | 10 | 210 | 6.0 |
| 18 | 0.048/1.22 | 16 | 270 | 6.5 |
| 16 | 0.060/1.52 | 20 | 365 | 7.65 |
| 14 | 0.075/1.91 | 28 | 530 | 8.85 |
| 13 | 0.090/2.29 | 32 | 680 | 9.75 |
| 12 | 0.105/2.67 | 38 | 830 | 10.6 |

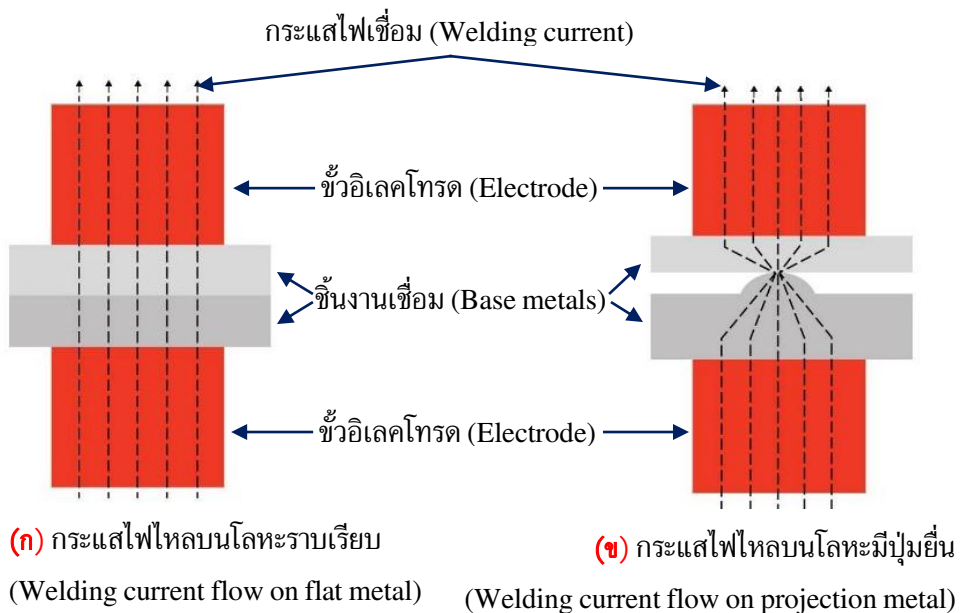
ข. การออกแบบการเชื่อมป้อนด้วยความต้านทาน

Girish P. Kelkar (2017) ได้กล่าวไว้ในงานวิจัยถึงการเชื่อมด้วยกรรมวิธีนี้ว่าจะต้องมีการออกแบบแผ่นขั้วอิเล็กโทรดไปตามลักษณะของรูปทรงชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม โดยขึ้นอยู่กับรูปทรงและจำนวนของป้อน/รอยป้อน/รอยนูนของโลหะชิ้นงาน และสามารถเชื่อมได้กับโลหะเหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสมที่มีความหนาอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 3.2 มม. เป็นสำคัญ ส่วนในบางกรณีที่ต้องเชื่อมวัสดุพิเศษก็ต้องมีเครื่องมือเฉพาะที่จะใช้ในการช่วยยับยั้งไม่ให้ป้อนหรือป้อนนูน (Projection) เกิดการยุบตัวเร็วเกินไป

ตารางที่ 4.14 ปัจจัยการเชื่อมป้อนยี่นจำนวน 4 ป้อน หรือ มากกว่า ที่สัมพันธ์กับความหนาโลหะ
ที่มา : Resistance Welding Manual, Resistance Welder Manufacturers, Association Alliance, 2003

| วัสดุโลหะชิ้นงานเชื่อม | เวลาเชื่อม | แรงกดอิเล็กโทรดแต่ละ | กระแสไฟเชื่อมแต่ละ |
|------------------------|--------------|----------------------|--------------------|
| เกรด | ความหนา (mm) | ป้อนยี่น (Ids) | ป้อนยี่น (kA) |
| 25 | 0.021/0.53 | 6 | 80 |
| 23 | 0.027/0.69 | 8 | 100 |
| 21 | 0.033/0.84 | 11 | 125 |
| 19 | 0.042/1.07 | 15 | 160 |
| 18 | 0.048/1.22 | 19 | 220 |
| 16 | 0.060/1.52 | 25 | 330 |
| 14 | 0.075/1.91 | 34 | 470 |
| 13 | 0.090/2.29 | 42 | 610 |
| 12 | 0.105/2.67 | 50 | 740 |

จำนวนของป้อนยี่น/รอยป้อน/รอยนูนของโลหะชิ้นงาน ช่างเชื่อมต้องพิจารณาเป็นประเด็นสำคัญ เพราะจะเป็นตัวกำหนดปัจจัยในการเชื่อม โดยเฉพาะการกำหนดปริมาณของกระแสไฟเชื่อม ด้วยเหตุที่พฤติกรรมกรไหลของกระแสจะมีทิศทางไปรวมกันที่ป้อนยี่นเพื่อสร้างความร้อนจากความต้านทานของกระแสไฟเชื่อม ดังนั้น ถ้ามีจำนวนป้อนยี่นที่จะเชื่อมมากขึ้นก็ต้องป้อนกระแสไฟเชื่อมที่เพิ่มสูงขึ้นเพื่อเฉลี่ยกระแสไฟไปในทุก ๆ ป้อนยี่นที่เท่า ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.53 ลักษณะการไหลของกระแสไฟในการเชื่อมป้อนยี่นด้วยความต้านทาน

ที่มา : Girish P. Kelkar, Ph.D., WJM Technologies, 2017.

การออกแบบการเชื่อมป้อนด้วยความดันที่พบเห็นกันมาก เป็นการออกแบบตามลักษณะของชิ้นงานประกอบ ซึ่งแบ่งได้ 4 ชนิดของรอยเชื่อมป้อน (Type of projection welds) ดังนี้

1. การเชื่อมป้อนแบบประทับ (Stamped projection welding) เป็นลักษณะของป้อนที่ปกติสามารถพบเห็นกันบ่อย ๆ ในการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น ชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ โดยการกดหรือประทับ (Stamped) ให้โลหะสองชิ้นติดกัน ดังแสดงการออกแบบป้อนแบบประทับของชิ้นงานโลหะเชื่อมและแนวเชื่อมที่ได้ ในรูปที่ 4.54 (ก)

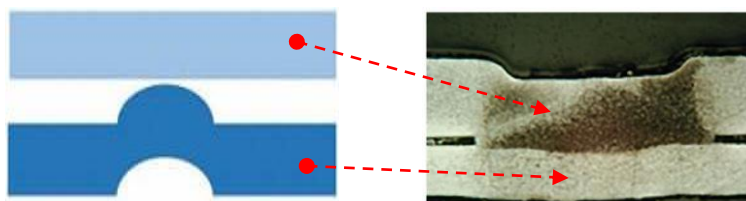
2. การเชื่อมป้อนแบบใช้เครื่องจักร (Machined projection welding) เป็นลักษณะการเชื่อมที่ต้องใช้กำลังของเครื่องจักรกดอัดป้อนให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างในบางส่วน (Deformation) และบางส่วนก็เกิดการหลอมละลายติดกัน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ภาชนะบรรจุที่ต้องการแนวเชื่อมเป็นชิ้นส่วนของการอุดรูหรือปิดฝาในตำแหน่งที่อาจมีการรั่วไหลของภาชนะ ดังแสดงการออกแบบป้อนแบบใช้เครื่องจักรของชิ้นงานโลหะเชื่อมและแนวเชื่อมที่ได้ ในรูปที่ 4.54 (ข)

3. การเชื่อมป้อนแบบเหรียญ (Coined projection welding) เป็นลักษณะของการเชื่อมป้อนที่ออกแบบป้อนที่เป็นก้าน/สลัก โดยที่ฐานเป็นรูปเหรียญวงกลมที่มีส่วนนูนออกมาแล้วกดให้เชื่อมติดกัน เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการสร้างก้านหรือสลัก (Pin) ยื่นออกมาเพื่อไว้สวมกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ดังแสดงการออกแบบป้อนแบบเหรียญของชิ้นงานโลหะเชื่อมและแนวเชื่อมที่ได้หลังการเชื่อมเสร็จ ในรูปที่ 4.54 (ค)

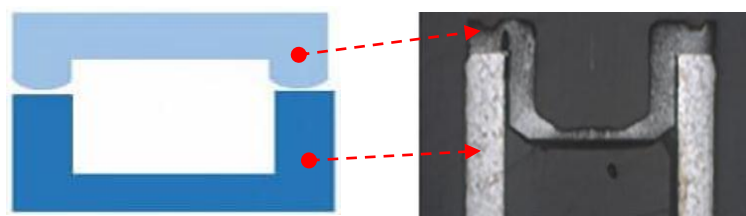
4. การเชื่อมป้อนแบบมุม (Corner projection welding) เป็นรูปแบบของการเชื่อมที่คล้ายกับแบบใช้เครื่องจักร (Machined projection welding) ลักษณะของป้อนหรือส่วนที่นูนออกมามีคล้ายกับหัวน็อต (Nut) วางบนชิ้นงานอีกชิ้น จากนั้นใช้แรงกดโดยส่วนที่หัวน็อตสัมผัสกันจะเกิดการหลอมละลายติดกัน ซึ่งรอยเชื่อมที่ติดกันมีลักษณะเป็นซีล (Seal) ทำหน้าที่ป้องกันการรั่วไหล พบว่าส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมชิ้นส่วนจำพวกถังบรรจุผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังแสดงการออกแบบป้อนแบบมุมของชิ้นงานโลหะเชื่อมและแนวเชื่อมที่ได้หลังการเชื่อมเสร็จ ในรูปที่ 4.54 (ง)

ค. เครื่องเชื่อมป้อนด้วยความดัน

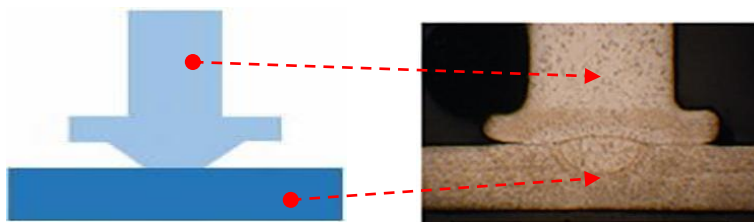
การเชื่อมป้อนด้วยความดันใช้เครื่องเชื่อมที่อาศัยระบบความดันทางกระแสไฟฟ้าสร้างความร้อนเพื่อการหลอมละลายเหมือนกับการเชื่อมความดันแบบอื่น ๆ โดยเครื่องเชื่อมจะพบเห็นกันทั้งแบบควบคุมการเชื่อมด้วยมือของช่างเชื่อมซึ่งเรียกว่าเครื่องแบบ Manual ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องเชื่อมในรูปที่ 4.55 (ก) เหมาะกับการเชื่อมงานที่มีจำนวนน้อยชิ้นแต่หลากหลายรูปแบบ กับประเภทเครื่องเชื่อมที่ถูกควบคุมการเชื่อมด้วยเซนเซอร์อัตโนมัติ ซึ่งเรียกว่าเครื่องแบบ Automatic ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องเชื่อมในรูปที่ 4.55 (ข) เหมาะกับงานเชื่อมแบบต่อเนื่องตลอดเวลาในระบบสายการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเชื่อมได้รวดเร็วและมีความแม่นยำสูง แต่อาจมีต้นทุนการผลิตที่สูงและต้องมีการดูแลซ่อมบำรุงระบบเป็นอย่างดี



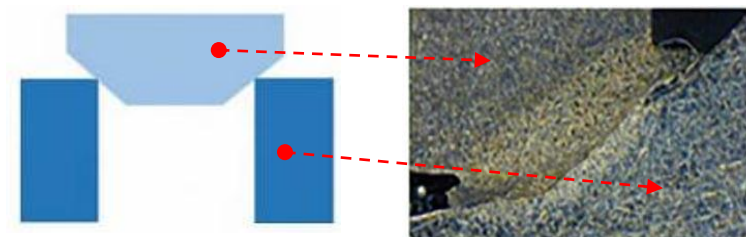
(ก) การเชื่อมปุ่มยื่นแบบประทับ (Stamped projection welding)



(ข) การเชื่อมปุ่มยื่นแบบใช้เครื่องจักร (Machined projection welding)



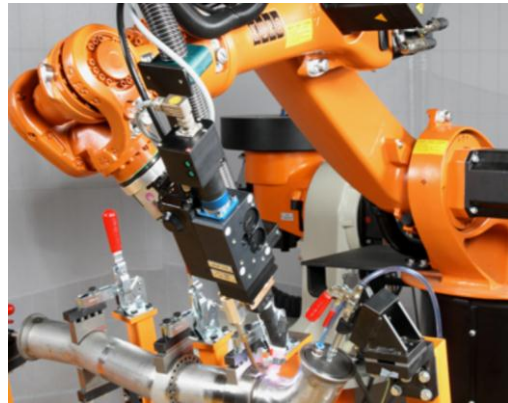
(ค) การเชื่อมปุ่มยื่นแบบเหรียญ (Coined projection welding)



(ง) การเชื่อมปุ่มยื่นแบบมุม (Corner projection welding)

รูปที่ 4.54 ชนิดของรอยเชื่อมปุ่มยื่นด้วยความดัน (Type of projection welds)

ที่มา : Girish P. Kelkar, Ph.D., WJM Technologies, 2017.



(ก) เครื่องเชื่อมป้อนแบบเชื่อมด้วยคน
(Manual projection welding machine)

(ข) เครื่องเชื่อมป้อนด้วยระบบควบคุม
อัตโนมัติ (Automatic projection welding
machine)

รูปที่ 4.55 ตัวอย่างเครื่องเชื่อมป้อนด้วยความต้านทาน

ที่มา : Shri Balaji Engineering, Product of Projection welding machine 2019

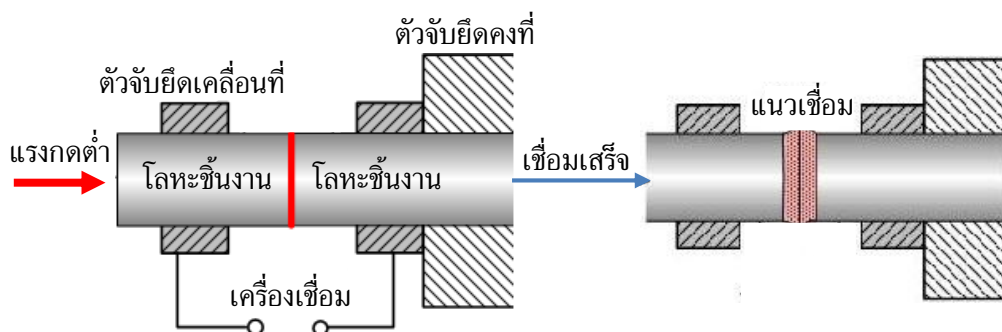
4.3.4 การเชื่อมต่อนด้วยความต้านทาน (Resistance butt welding)

ขบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานวิธีนี้เป็นการเชื่อมแบบต่อชน (Butt joint) ที่อาศัยความร้อนจากการต้านทานกระแสไฟฟ้าซึ่งมีกรรมวิธีการเชื่อมที่คล้าย ๆ กันอยู่ 2 กรรมวิธี โดยจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดของแต่ละวิธีการเชื่อม โดยอ้างอิงตาม Malur Srinivasan (2007) ดังต่อไปนี้

1. กรรมวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance upset welding) ซึ่งบางครั้งก็เรียกว่าการเชื่อมชนด้วยความต้านทานวิธี UW นิยมใช้ในการเชื่อมโลหะที่เป็นท่อ (Pipe) และโลหะที่เป็นแท่งตัน (Rod) (ที่มีขนาดไม่โตมากนัก) โดยวางชิ้นงานโลหะที่จะเชื่อม 1 ชิ้น บนด้านตัวจับยึดคงที่ กับอีก 1 ชิ้น บนด้านตัวจับยึดเคลื่อนที่ จากนั้นก็เคลื่อนชิ้นงานเข้าหากันเมื่อสัมผัสก็ปล่อยกระแสไฟฟ้าแบบ Heavy current เพื่อให้เกิดความร้อนจากความต้านทาน ในขณะเดียวกันเครื่องเชื่อมก็จะใช้แรงดันชิ้นงานด้านตัวจับเคลื่อนที่ให้เข้าไปชนกันเพื่อให้ปลายชิ้นงานหลอมติดกันเป็นแนวเชื่อม ดังแสดงองค์ประกอบและขบวนการเชื่อมในรูปที่ 4.56 (ก) และ (ข) ตัวอย่างการเชื่อมเหล็กเพลลาข้ออ้อย

2. กรรมวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance flash welding) ซึ่งบางครั้งเรียกว่าการเชื่อมชนด้วยความต้านทานวิธี FW นิยมเชื่อมงานโลหะแท่งที่มีขนาดโต เช่น รางรถไฟ หรือเหล็กท่อนที่มีความหนาแน่น ๆ โดยขบวนการเชื่อมจะเหมือนกันกับวิธีการเชื่อม (Upset welding) ต่างกันที่วิธีการนี้จะใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมจากขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นกระแสแบบ Light current ไหลผ่านปลายชิ้นงานเชื่อมแล้วเกิดการอาร์กเพื่อทำให้เกิดการหลอมละลาย ในขณะอาร์กก็จะมีแรงดันเคลื่อนปลายชิ้นงานชน

กันด้วยแรงดันที่ค่อนข้างสูง เพื่อให้เนื้อโลหะที่เกิดการหลอมอัดตัวติดแน่นกัน ซึ่งแนวเชื่อมที่ได้มีลักษณะที่มีส่วนนูนออกมาค่อนข้างมาก ดังแสดงองค์ประกอบและขั้นตอนการเชื่อมในรูปที่ 4.57 (ก) และ (ข) ตัวอย่างการเชื่อมเหล็กกรางรถไฟ



(ก) กรรมวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance upset welding)

ที่มา : Substances & Technologies, Resistance Welding, 2012

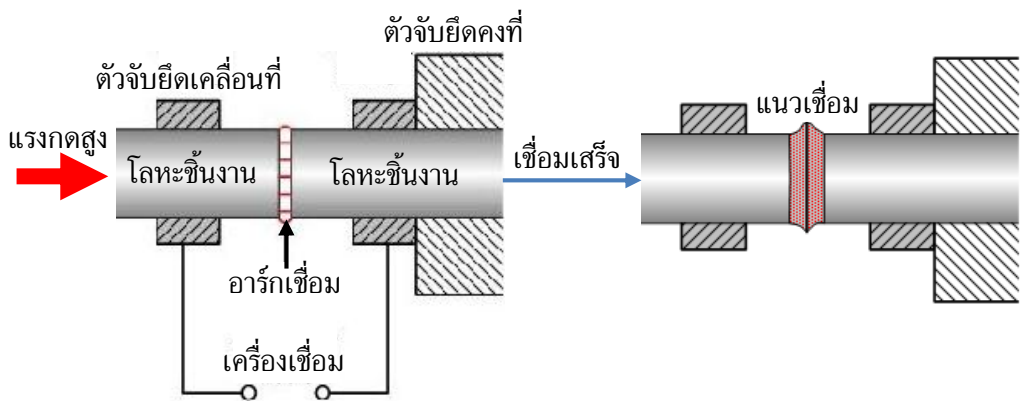


(ข) ตัวอย่างการเชื่อมต่อชนเหล็กเพลาช้อ้อยด้วยวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance upset welding)

ที่มา : Heavy duty upset welder, 2015

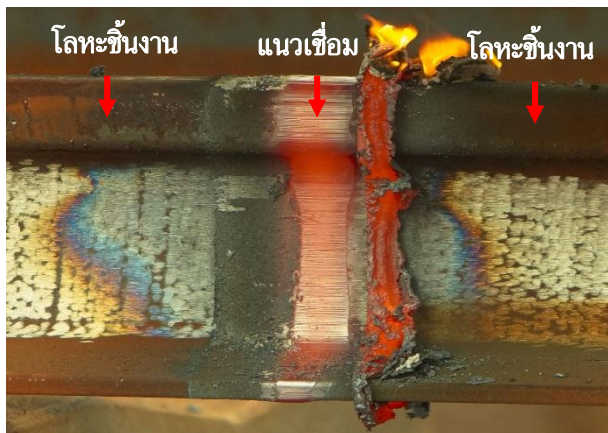
รูปที่ 4.56 กรรมวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance upset welding)

สำหรับเครื่องเชื่อมของทั้งสองกรรมวิธีการเชื่อม อาศัยหลักความต้านทานจากกระแสไฟฟ้าจนเกิดเป็นพลังงานความร้อนใช้หลอมละลายเนื้อโลหะให้ติดกันเกิดเป็นแนวเชื่อมที่เหมือนกัน ซึ่งขณะเชื่อมกระแสไฟจะไหลผ่านชิ้นงานโลหะ และพบว่า กรรมวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน (UW) จะมีปริมาณกระแสไหลผ่านที่ค่อนข้างมากหรือหนัก (Heavy current) เพราะต้องการความต้านทานที่สูงเพื่อสร้างความร้อนที่สูงตาม ส่วนกรรมวิธีการเชื่อมวบด้วยความต้านทาน ต้องการปริมาณกระแสที่น้อยกว่าหรือเบา (Light current) โดยได้สร้างภาพเปรียบเทียบการไหลของกระแสไฟเชื่อมของทั้งสองกรรมวิธีไว้ในรูปที่ 4.58 และตัวอย่างเครื่องเชื่อมของทั้งสองกรรมวิธีการเชื่อม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.59



(ก) กรรมวิธีการเชื่อมวาวด้วยความต้านทาน (Resistance flash welding)

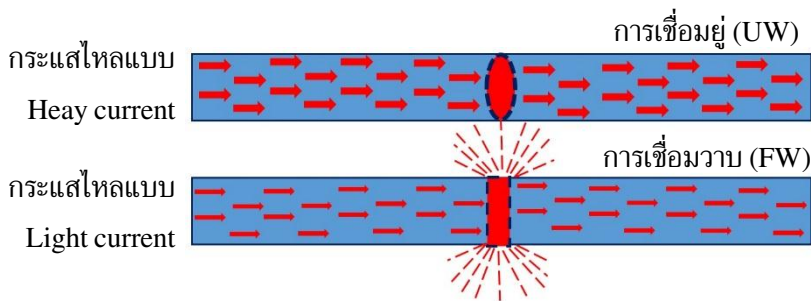
ที่มา : Substances & Technologies, Resistance Welding, 2012



(ข) ตัวอย่างการเชื่อมต่อชน
เหล็กแรงกล้าด้วยวิธีการ
เชื่อมวาวด้วยความต้านทาน
(Resistance flash welding)

ที่มา : Railroad forums, Flash
Butt Weld, 2010

รูปที่ 4.57 กรรมวิธีการเชื่อมวาวด้วยความต้านทาน (Resistance flash welding)



รูปที่ 4.58 เปรียบเทียบปริมาณการไหลของกระแสไฟเชื่อมสร้างความต้านทาน

ที่มา : How To Resistance Weld, 2010 (เขียนใหม่)



(ก) เครื่องเชื่อมวาวรางรถไฟแบบเคลื่อนที่
(Mobile flash weld railway welding machine)

ที่มา : Plasser & Theurer, Railway Welding, 2011



(ข) เครื่องเชื่อมวาวรางรถไฟแบบประจำที่
(Stationary flash weld rail way welding machine)

ที่มา : KZESO, Railway Welding, 2006



(ค) เครื่องเชื่อมวาวใบเลื่อย (Flash weld band saw welding machine)

ที่มา : Cruxweld Tech, 2018



(ง) เครื่องเชื่อมอยู่เพลา/ลวด/ท่อ กลม
(Flash weld rod/wire/pipe welding machine)

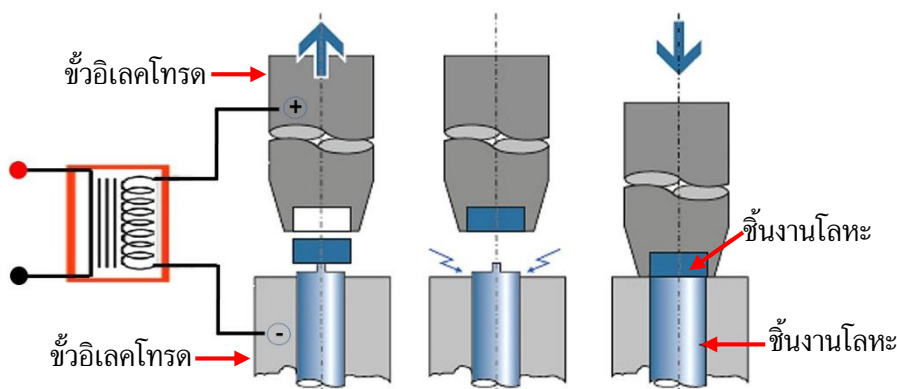
ที่มา : Montfort International, 2015

รูปที่ 4.59 เครื่องเชื่อมอยู่ด้วยความต้านทาน (UW) และเชื่อมวาวด้วยความต้านทาน (FW)

ที่มา : How To Resistance Weld, 2010 (เขียนใหม่)

4.3.5 การเชื่อมกระแทกด้วยความต้านทาน (Resistance percussion welding)

การเชื่อมกระแทกเป็นขบวนการเชื่อมที่อาศัยความต้านทานของกระแสไฟฟ้าอีกชนิดหนึ่ง ที่นิยมใช้เชื่อมต่อกับจำพวกโลหะชิ้นงานขนาดเล็ก ๆ เช่น เส้นลวด (Wire metals) ขนาดต่าง ๆ หรือชิ้นส่วนที่มีลักษณะเป็นแท่งต่าง ๆ เช่น สลักเกลียว และเพลาลูกเบี้ยว เป็นต้น โดยระบบการเชื่อมประกอบด้วย แหล่งพลังไฟฟ้า และขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองที่มีหน้าที่จับยึดชิ้นงานโลหะที่ต้องการเชื่อม โดยออกแบบการจับยึดให้เหมาะสมกับลักษณะรูปทรงของชิ้นงานเชื่อม เมื่อนำชิ้นงานเข้าตำแหน่งจับยึดที่ขั้วอิเล็กโทรด จากนั้นปล่อยกระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างความร้อนจากระบบความต้านทานกระแสไฟฟ้า เมื่อชิ้นงานร้อนมากจนเกือบหลอมละลาย เครื่องเชื่อมจะปล่อยระบบกลไกแรงกระแทกหรือแรงการตอก (Percussion) ให้ชิ้นงานเคลื่อนมากระทบกัน ด้วยความร้อนบวกกับแรงกระแทกร่วมกันทำให้โลหะชิ้นงานสองชิ้นหลอมติดกันเป็นแนวเชื่อม ดังแสดงระบบของการเชื่อมดังกล่าวในรูปที่ 4.60

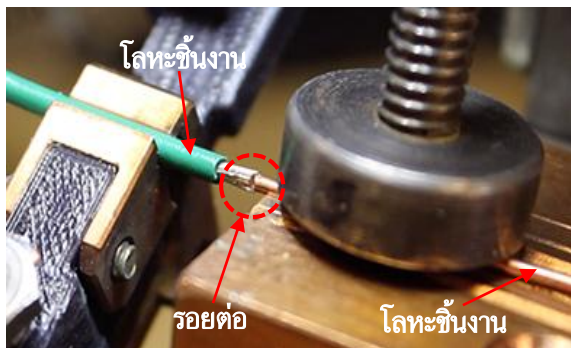


รูปที่ 4.60 ขบวนการเชื่อมกระแทกด้วยความต้านทาน (Resistance percussion welding)

ที่มา : SNS Institutions, Welding Technology 2019 (เขียนใหม่)

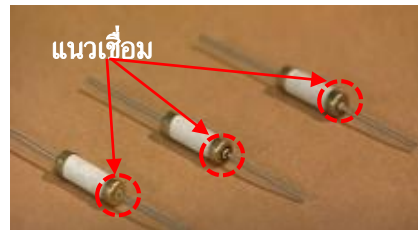
การเชื่อมกระแทกหรือการเชื่อมด้วยการตอกด้วยความต้านทานนี้มีหลักการที่คล้ายกับการเชื่อมแบบวาบ (FW) มักนิยมใช้กับลักษณะงานที่วิธีการเชื่อมวาบไม่สามารถเชื่อมได้ เช่น ชิ้นงานเชื่อมลวดขนาดเล็ก ๆ หรือชิ้นงานในลักษณะที่วิธีการอื่นไม่สามารถเชื่อมได้ โดยกรรมวิธีการเชื่อมนี้ใช้เวลาในการเชื่อมต่อชิ้นสั้นมาก โดยประมาณจะน้อยกว่า 0.1 วินาที เหตุเพราะจะสร้างความต้านทานเพื่อให้เกิดความร้อนในพื้นที่เฉพาะปลายชิ้นงาน (Particular area heating) ดังนั้น แนวเชื่อมจะไม่เกิดผลกระทบกับพื้นที่โลหะรอบข้างที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายได้ เช่น การเชื่อมวัสดุทองเหลืองหรือโลหะทองแดงที่หุ้มสายทองแดงจะไม่เสียหาย หรือการเชื่อมอุปกรณ์ชิ้นส่วนที่เสี่ยงต่อความเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 4.61(ก) และ (ข) ตามลำดับ และกรรมวิธีการเชื่อมนี้ยังเหมาะสำหรับการเชื่อมวัสดุโลหะต่างชนิดที่อาจมีจุดหลอมเหลวต่างกัน คำนวณความร้อนต่างกันรวมถึงขนาดความหนาที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.61 (ค) แต่อย่างไรก็ตามวิธีการเชื่อมนี้ก็ไม่สามารถที่จะเชื่อมโลหะชิ้นงานที่มีความหนามากเกินพื้นที่หน้าตัด 600 ตารางมิลลิเมตร โดยประมาณได้ และมักไม่นิยมเชื่อมวัสดุโลหะที่เหมือนกัน (Similar

materials) แต่จะเหมาะกับการเชื่อมวัสดุโลหะที่ต่างชนิดกัน (Disimilar materials) ดังแสดงตัวอย่าง ขนาด ชนิดของวัสดุโลหะเชื่อมที่ต่างกัน และรูปทรงของผลิตภัณฑ์ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมกระแทบด้วยความต้านทานในรูปที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.61 (ง) อ้างอิงตาม AMADA WELD (2020)



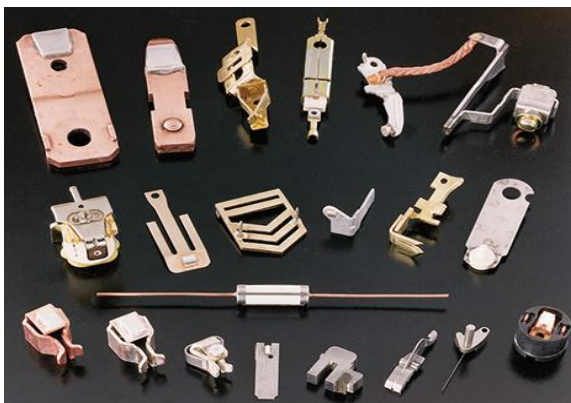
(ก) การเชื่อมกระแทบลวดทองแดงของสายไฟฟ้า

ที่มา : MTI Micro Welding, 2015



(ข) การเชื่อมกระแทบอุปกรณ์ชิ้นส่วนที่เสี่ยงต่อความเสียหาย

ที่มา : TWI, Percussive Welding, 2015



(ง) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมกระแทบ

ที่มา : HANSON Welding Machines, 2019



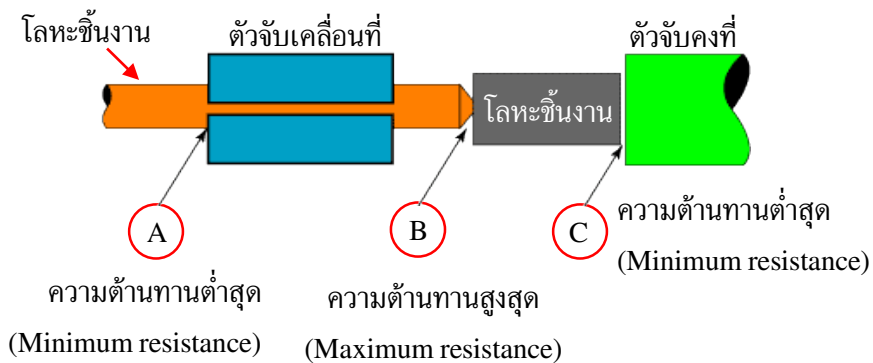
(ค) การเชื่อมกระแทบโลหะต่างชนิด

ที่มา : SNS Institutions, Welding Technology 2019

รูปที่ 4.61 ลักษณะของการเชื่อมกระแทบด้วยความต้านทานของผลิตภัณฑ์รูปแบบต่าง ๆ

สำหรับเครื่องเชื่อมที่ใช้กับขบวนการเชื่อมแบบกระแทบด้วยความต้านทานนี้จะมีระบบหม้อแปลงกระแสไฟสำหรับการเชื่อมเหมือนกับเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบอื่น ๆ แต่ได้มีการออกแบบระบบของวงจรไฟฟ้าที่สามารถสร้างความต้านทานแตกต่างกันของแต่ละตำแหน่งที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โดยปกติของขบวนการเชื่อมนี้จะมีตำแหน่งของความต้านทานอยู่ 3 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.62 กล่าวคือ ตำแหน่ง A มีความต้านทานต่ำสุด (Minimum resistance) เหตุเพราะเป็นความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงาน ซึ่งมีพื้นที่สัมผัสกันมากส่งผลต่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลกระจายความต้านทานไปทั่วผิวสัมผัสความต้านทานจึงต่ำ ลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นเหมือนกันกับตำแหน่ง C แต่สำหรับตำแหน่ง B เป็นตำแหน่งที่มีความต้านทานกระแสสูงสุด (Maximum resistance) เนื่องจาก

ปลายชิ้นงานที่เชื่อมมีลักษณะเรียวแหลมที่เรียกว่า Shisel point ด้วยเหตุที่กระแสไฟเชื่อมทั้งหมดไหลผ่านพื้นที่แคบและน้อย จะเกิดความหนาแน่นของกระแสขึ้นส่งผลให้ตำแหน่งนี้เกิดความต้านทานที่สูงที่สุด และเกิดความร้อนได้มากและรวดเร็ว ซึ่งเมื่อต้นชิ้นงานเข้าหากันจึงเกิดการหลอมติดกันได้ง่ายและรวดเร็ว โดยปัจจัยการเชื่อมจะถูกกำหนดขึ้นตามขนาดของโลหะชิ้นงาน



รูปที่ 4.62 ตำแหน่งของการเกิดความต้านทานและความร้อนของขบวนการเชื่อมกระทบ

ที่มา : Comment Inter Technologies, Inc., Percussive Arc Welding, 2007 (เขียนใหม่)

ชนิดของเครื่องเชื่อมที่ใช้มีหลายขนาดขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานมีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 4.63



(ก) เครื่องเชื่อมกระทบแบบขนาดเล็ก

ที่มา : MTI, Microwelding, 2020

รูปที่ 4.63 เครื่องเชื่อมกระทบด้วยความต้านทาน

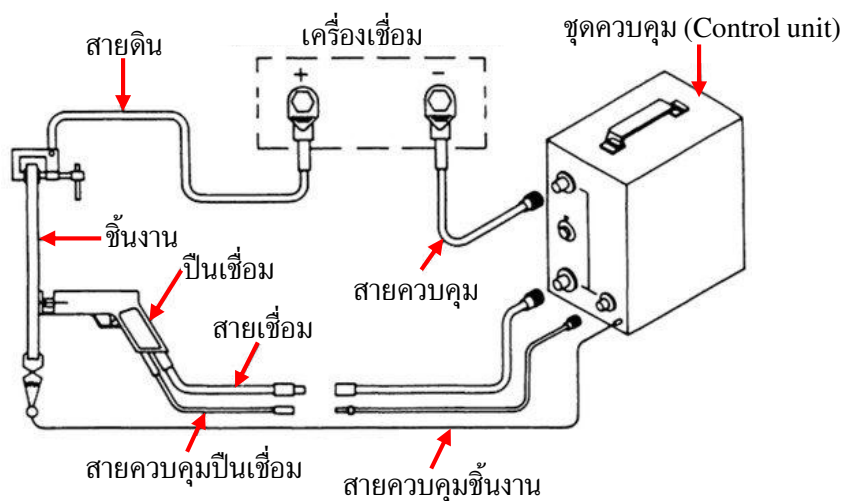
(ข) เครื่องเชื่อมกระทบแบบขนาดใหญ่

ที่มา : Pef Welding Engineering, Hennigsdorf, 2020

4.4 กรรมวิธีการเชื่อมสลักเกลียว (Stud Arc Welding : SW)

การเชื่อมสลักเกลียวหรือที่นิยมเรียกกันสั้น ๆ ว่า “เชื่อมสตั๊ด” เป็นขบวนการเชื่อมที่จัดอยู่ในกลุ่มประเภทของการเชื่อมอาร์ก (Arc welding processes) เป็นวิธีการเชื่อมที่ค่อนข้างพิเศษเฉพาะงาน เป็นลักษณะงานที่ต้องการส่วนที่ยื่นออกมาจากชิ้นส่วนหลักที่เป็นโลหะแผ่น โดยไม่ต้องทำการเจาะหรือทำเกลียวบนพื้นที่ของแผ่นโลหะหลัก ได้แก่ลักษณะงานจำพวกสลักเกลียว (Bolt) สลักหมุด (Pin) สกรู (Screw) หรือเดือยแหลม (Spike) ต่าง ๆ เป็นต้น กล่าวไว้โดย Complete Stud Welding (2017)

ขบวนการเชื่อมจะใช้แหล่งกำลังงานจากเครื่องเชื่อมแบบหม้อแปลงเพื่อการอาร์ก โดยผ่านชุดควบคุม เมื่อเกิดการอาร์กการหลอมเหลวจะเกิดขึ้นกับผิวของโลหะแผ่นและที่ปลายของสลักเกลียว ซึ่งต่อจากนั้นป็นเชื่อมจะยิงหรือกดสลักเกลียวเข้าหาแผ่นโลหะเพื่อจะให้โลหะทั้งสองชิ้นติดกัน ดังแสดงระบบของขบวนการเชื่อมในรูปที่ 4.64 ขนาดและชนิดของโลหะที่ใช้เป็นสลักเกลียว (Bolt) กับโลหะแผ่น (Base metal) หลักเป็นตัวกำหนดปัจจัยของการเชื่อมได้แก่ กระแสไฟเชื่อม (Welding current) และเวลาอาร์ก (Arc time) ขบวนการเชื่อมนี้เป็นที่นิยมกันมาก อาจเป็นเพราะสามารถเชื่อมได้อย่างรวดเร็วและช่างเชื่อมไม่จำเป็นต้องมีทักษะที่สูงมาก และปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการเชื่อมสตั๊ดแบบต่าง ๆ ที่ทันสมัย ทำให้ผลิตภัณฑ์มีมูลค่าเพิ่มขึ้น สะดวก ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูง



รูปที่ 4.64 ระบบของขบวนการเชื่อมสลักเกลียว (Stud arc welding)

ที่มา : ASM Metal Handbook Vol. 6, 1993. (ปรับปรุงใหม่)

เทคนิคการเชื่อมสลักเกลียวหรือการเชื่อมสตั๊ด นิยมใช้งานกันมากในงานอุตสาหกรรมการผลิตและอุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยเฉพาะชิ้นส่วนยานยนต์ มีเทคนิคหรือวิธีการเชื่อมที่ได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยของ K Hartz-Behrend et al. (2014) โดยมีเป็นลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เทคนิคการเชื่อมสลักเกลียวด้วยการอาร์ก (Arc stud welding) ช่างเชื่อมมักเรียกเทคนิคนี้ว่า “การเชื่อมสตั๊ดประกายไฟ” เป็นการเชื่อมสตั๊ดที่มีรอยเชื่อมแข็งแรงสูงบนโลหะแผ่นงานที่บาง 2 มม.

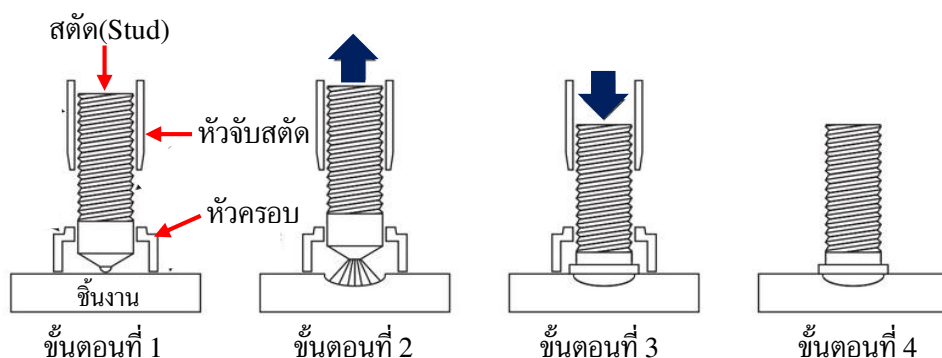
และใช้เวลาเชื่อมสั้นเพียง 0.06 วินาที โดยมีขั้นตอนของการเชื่อม 4 ขั้นตอน ดังแสดงใน **รูปที่ 4.65** กล่าวคือ

ขั้นตอนที่ 1 นำสตั๊ด (Stud) บรรจุเข้าไปในตำแหน่งหัวจับสตั๊ด (Chuck) ของปืนเชื่อม โดยที่บริเวณปลายของสตั๊ดต้องมีหัวครอบเซรามิกส์ (Ferrule) ติดไว้ที่ปลายปาก (เพื่อทำหน้าที่กักเก็บโลหะหลอมเหลวที่เกิดจากการอาร์กให้อยู่ภายใน) ดังตัวอย่างใน **รูปที่ 4.66** แล้วนำปืนเชื่อมไปวางตำแหน่งที่ต้องการเชื่อม

ขั้นตอนที่ 2 ทำการกดไกปืนเชื่อมเพื่อให้กระแสไฟฟ้าส่งสัญญาณของการปล่อยพลังงานมาที่ชุดกลไกของปืน ให้เคลื่อนสตั๊ด (Stud) ออกมาเพื่อให้เกิดการอาร์ก (Arc) ขึ้นระหว่างหัวสตั๊ดกับผิวโลหะงาน (Base metal) ขณะที่อาร์กสตั๊ดจะถูกดันขึ้นสูงเนื่องจากแรงดันของการอาร์ก

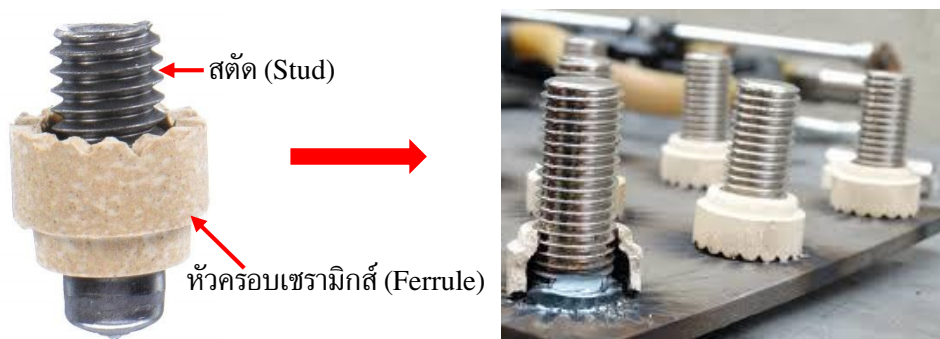
ขั้นตอนที่ 3 เกิดการหลอมละลายและปลายสตั๊ดจะถูกกดให้จม (Sinking) ลงไปในบ่อหลอมละลายพร้อมกับลดพลังงานของการอาร์กลง

ขั้นตอนที่ 4 โลหะหลอมเหลวเย็นตัวลงและเกิดการเชื่อมติดกันอย่างสมบูรณ์ของหัวสตั๊ดกับชิ้นงานโลหะด้วยแนวเชื่อม ปืนเชื่อมพร้อมหัวครอบก็จะยกตัวขึ้นและเคลื่อนออกมาเสร็จสิ้นขบวนการเชื่อม



รูปที่ 4.65 ขั้นตอนของเทคนิคการเชื่อมสลักเกลียว/สตั๊ดด้วยการอาร์ก (Arc stud welding)

ที่มา : K. Hartz-Behrend et.al., *Journal of Physic : Conference Series* 550, 2014. (ปรับปรุงใหม่)



รูปที่ 4.66 การสวมหัวครอบเซรามิกส์ (Ferrule) เข้ากับปลายสตั๊ด

ที่มา : EXTREME : Bolt & Fastener-Inconel weld studs, 2018

การประยุกต์ใช้งานเทคนิคการเชื่อมสลักเกลียวด้วยการอาร์ก (Arc stud welding)

- เหมาะสำหรับสตั๊ดที่ผลิตจากโลหะเหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิม อลูมิเนียม และทองเหลืองขนาด M6–M22
- เหมาะสำหรับการเชื่อมบนโลหะแผ่นบางไม่น้อยกว่า 2 มม. โดยมีระยะจมนของสตั๊ดบนผิวโลหะงานเพียง 1–3 มม. โดยใช้เวลาเชื่อมสั้นมากเมื่อเทียบกับวิธีการเชื่อมแบบอื่น ๆ
- เหมาะสำหรับงานโครงสร้างต่าง ๆ หรืองานที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมการต่อเรือ เป็นต้น
- เหมาะสำหรับผิวงานที่ไม่สะอาดมากนัก เพราะมีหัวครอบเซรามิกส์ (Ferrule) ช่วยในการกักของเหลวจากการหลอมละลาย ซึ่งเป็นตัวช่วยจัดสิ่งสกปรกบนผิวชิ้นงานของตำแหน่งที่ทำการเชื่อม
- เหมาะสำหรับงานที่ต้องการโชว์พื้นผิวงาน เพราะเกิดเป็นรอยรอยของการเชื่อมเพียงด้านเดียว
- เหมาะสำหรับงานที่ต้องการรอยเชื่อมสตั๊ดที่แข็งแรง ป้องกันการสั่นสะเทือนที่อาจเกิดการหลุดของรอยต่อได้เป็นอย่างดี และสามารถเชื่อมบนโลหะชิ้นงานที่มีสีเคลือบผิวได้

เครื่องเชื่อมและหัวเชื่อมสตั๊ดแบบอาร์ก (Arc stud welding machine and welding gun)

เครื่องเชื่อมและหัวเชื่อมของกรรมวิธีการเชื่อมสตั๊ดแบบการอาร์ก เป็นการเชื่อมที่นิยมใช้กันมากทั้งในงานที่เป็นระบบการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมและงานภาคสนามทั่วไป เหตุผลเพราะเป็นการเชื่อมเสริมชิ้นส่วนย่อยกับกับชิ้นส่วนหลัก ได้แก่ เชื่อมจ๊ากพวก Bolt กับ Nut สลักหมุดต่าง ๆ เข้ากับแผ่นโลหะเพื่อการประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังนั้น ผู้ผลิตเครื่องเชื่อมได้มีการออกแบบเครื่องเชื่อมให้เหมาะสมกับลักษณะของงาน ซึ่งมีทั้งเครื่องเชื่อมแบบปกติที่ใช้กับงานกันทั่ว ๆ ไป (Stationary stud welding machine) และเครื่องเชื่อมแบบพกพาสามารถเคลื่อนที่ไปใช้ในที่ต่าง ๆ ได้ (Portable stud welding machine) และแบบติดตั้งประจำในระบบสายการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นระบบการเชื่อมอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยระบบ CNC (Automatic stud welding machine) ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องเชื่อมทั้งสามแบบในรูปที่ 4.67 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ โดยมีป็นเชื่อมเป็นองค์ประกอบสำคัญ ซึ่งป็นเชื่อมมีการออกแบบรูปร่างและรูปทรงที่หลากหลายเพื่อให้สามารถนำไปใช้กับเครื่องเชื่อมแต่ละชนิดหรือตามลักษณะของงานที่เหมาะสม โดยมีองค์ประกอบหลักในการใช้งานของชิ้นส่วนป็นเชื่อมจะเหมือนกัน มีเพียงส่วนประกอบเสริมบางส่วนที่นำมาประกอบเพื่อลักษณะเฉพาะงานบางอย่าง ดังแสดงตัวอย่างรูปทรงของป็นเชื่อมที่นิยมใช้งานกันในรูปแบบที่ 4.67 (ง) เป็นข้อมูลที่ให้คำแนะนำในการเลือกเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับขบวนการเชื่อมแบบสตั๊ดอาร์ก โดยผู้ผลิต THOMAS –Welding systems (2013) และผู้ผลิต Weldtron Engineering (2018)



(ก) เครื่องเชื่อมสตั๊ดแบบเคลื่อนที่
ที่มา : THOMAS –Welding systems, 2013

(ข) เครื่องเชื่อมสตั๊ดแบบพกพา
ที่มา : Nelson –Portable welding machine, 2016



(ค) เครื่องเชื่อมสตั๊ดแบบระบบ CNC
ที่มา : HBS – Stud welding automated CNC, 2017



(ง) ลักษณะรูปทรงของปืนเชื่อมแบบต่าง ๆ ที่นิยมใช้งาน
ที่มา : Weldtron Engineering – Stud welding gun, 2018

รูปที่ 4.67 เครื่องเชื่อมและหัวเชื่อมของการเชื่อมสตั๊ดแบบการอาร์ก (Arc stud welding)

2. เทคนิคการเชื่อมสลักเกลียวด้วยวิธีการปล่อยประจุ (Capacitor discharge stud welding) ข้างเชื่อมมักเรียกเทคนิคนี้ว่า “การเชื่อม CD stud” เป็นการเชื่อมสลักเกลียวหรือสลักหมุดต่าง ๆ ที่ต้องใช้แบบสตั๊ดที่มีลักษณะด้านปลายมีปุ่มส่วนยื่นออกมา (Ignition tip) ซึ่งแตกต่างกับสตั๊ดที่ใช้ในการเชื่อมแบบอาร์ก ดังแสดงการเปรียบเทียบปลายของสตั๊ดที่แตกต่างกันในรูปที่ 4.68 สำหรับกรรมวิธีการเชื่อมนี้จะมีลักษณะที่คล้ายกับวิธีการเชื่อมแบบอาร์กค่อนข้างมาก โดยการเชื่อมแบบการปล่อยประจุจะมีอุปกรณ์ชุดเก็บประจุไฟในการผลิตและปล่อยพลังงาน โดยไม่จำเป็นต้องมีหัวครอบเซรามิกส์ (Ferrule) ที่ใช้เก็บโลหะหลอมเหลวเหมือนกับการเชื่อมแบบอาร์ก อ้างอิงข้อมูลจาก A. Magda et al. (2018)



รูปที่ 4.68 การเปรียบเทียบความแตกต่างของลักษณะรูปร่างของตัวสตั๊ด
ที่มา : EXTREME : Bolt & Fastener-Inconel weld studs, 2018

(ก) สตั๊ดสำหรับวิธีเชื่อมแบบอาร์ก (ข) สตั๊ดสำหรับวิธีเชื่อมแบบปล่อยประจุ

ขั้นตอนการเชื่อมสตั๊ดแบบปล่อยประจุ (CD process) ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 4.69

ขั้นตอนที่ 1 นำสตั๊ด (Stud) ที่ออกแบบใช้เฉพาะแบบปล่อยประจุบรรจุเข้าไปในหัวจับสตั๊ด (Chuck) ทางด้านปลายของปืนเชื่อม จากนั้นนำไปวางที่ตำแหน่งต้องการเชื่อม โดยกำหนดความแม่นยำจากปลายของปุ่มยื่นสตั๊ด (Ignition tip) จะต้องตรงและสัมผัสกับพื้นผิวของแผ่นโลหะชิ้นงานเชื่อม

ขั้นตอนที่ 2 กดไกปืนเชื่อมเพื่อปล่อยพลังงานออกมาจากตัวเก็บประจุทันที (Capacitor discharge) โดยประจุจะวิ่งผ่านปุ่มยื่นของปลายสตั๊ด ซึ่งปกติมีขนาดเล็กจึงไม่สามารถทนต่อพลังงานปริมาณที่มากที่ถูกปล่อยออกมาจึงเกิดการหลอมละลาย

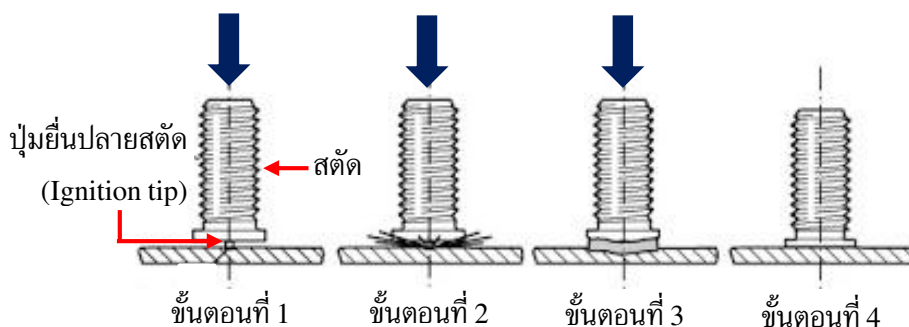
ขั้นตอนที่ 3 ขณะที่ปุ่มยื่นของสตั๊ดเกิดการหลอมละลายเป็นช่วงเวลาอันสั้น จะเกิดช่องว่าง (Gap) ขึ้นระหว่างปลายสตั๊ดกับผิวชิ้นงาน ซึ่งเป็นเวลาเดียวกันที่ปืนเชื่อมกดอัดปลายสตั๊ดเข้าหาแผ่นโลหะชิ้นงานผ่านโลหะหลอมเหลวเมื่อโลหะเย็นลงชิ้นงานจะติดกันเป็นแนวเชื่อม

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อครบรอบเวลา (Cycle time) ปืนเชื่อมจะถูกดันขึ้นจากสตั๊ดที่เชื่อมเสร็จเรียบร้อยแล้วเป็นอันเสร็จสิ้นขั้นตอนการเชื่อมสตั๊ดแบบปล่อยประจุ ดังแสดงตัวอย่างการเชื่อมและชิ้นงานเชื่อมเสร็จในรูปที่ 4.70

การประยุกต์ใช้งานเทคนิคการเชื่อมสลักเกลียวด้วยการปล่อยประจุ (CD stud welding)

- เหมาะสำหรับสตั๊ดที่ผลิตจากโลหะเหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิม อลูมิเนียม และทองเหลืองขนาด M3–

- เหมาะสำหรับการเชื่อมบนโลหะแผ่นงานที่บางน้อยกว่า 0.5 มม. โดยมีระยะจมนของสัดบนผิวโลหะงานเพียง 0.1 มม.
- เหมาะสำหรับงานชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็ก ๆ น้ำหนักเบา เพราะใช้เวลาในการเชื่อมสั้นมาก เช่น ใช้เวลาเพียง 0.01 วินาที กับชิ้นงานที่มีขนาด 0.02 นิ้ว
- เหมาะสำหรับงานที่ต้องการโชว์พื้นผิวงาน เพราะความร้อนจากการเชื่อมน้อย ลดปัญหาการไหม้หรือทำลายสารเคลือบบนพื้นผิวชิ้นงาน เกิดเป็นร่องรอยของการเชื่อมเพียงด้านเดียว
- เหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีจุดหลอมเหลวหรือหนาบางแตกต่างกันได้ดี เพราะรอยเชื่อมมีระยะลึกเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.69 ขั้นตอนของเทคนิคการเชื่อมสัดด้วยการปล่อยประจุ (CD stud welding)

ที่มา : THOMAS-Welding : Stud welding, 2013



(ก) การเชื่อมสัดด้วยวิธีการปล่อยประจุ



(ข) ตัวอย่างชิ้นงานเชื่อม

รูปที่ 4.70 วิธีการเชื่อมสัดด้วยการปล่อยประจุและชิ้นงานเชื่อมเสร็จ

ที่มา : Sunbelt : Studwelding INC, 2018

เครื่องเชื่อมและหัวเชื่อมสัดแบบปล่อยประจุ (CD stud welding machine and welding gun)

เครื่องเชื่อมและหัวเชื่อมของกรรมวิธีการเชื่อมสัดแบบปล่อยประจุ มีระบบกลไกการทำงานคล้ายกับการเชื่อมสัดแบบอาร์ก ต่างกันที่การออกแบบให้เหมาะสมกับปัจจัยการเชื่อมโลหะแผ่นที่มีขนาดบาง ๆ ซึ่งประเภทของเครื่องเชื่อมและปืนเชื่อมได้แสดงไว้เป็นตัวอย่างในรูปที่ 4.71



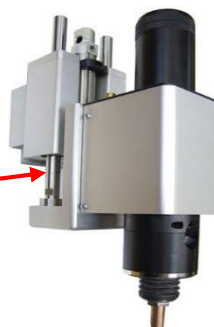
(ก) เครื่องเชื่อมสตั๊ดแบบเคลื่อนที่

ที่มา : TAYLOR–Stud welding systems, 2011



(ข) เครื่องเชื่อมสตั๊ดแบบพกพา

ที่มา : TAYLOR–Stud welding systems, 2011



หัวเชื่อมสำหรับเครื่องเชื่อมสตั๊ดแบบระบบอัตโนมัติ (Automatic stud welding head)

(ค) เครื่องเชื่อมสตั๊ดแบบระบบอัตโนมัติ

ที่มา : Motoman– Stud welding robot, 2012



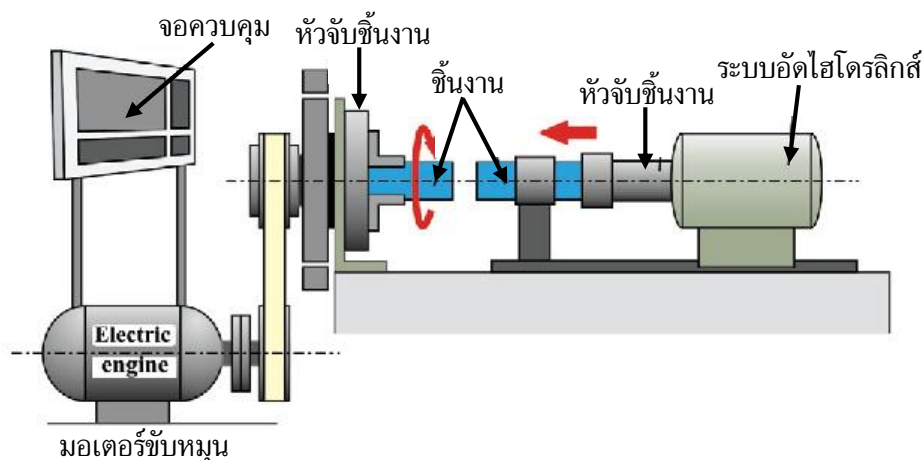
(ง) ลักษณะรูปทรงของปืนเชื่อมแบบต่าง ๆ ที่นิยมใช้งาน

ที่มา : THOMAS Welding systems, 2014

รูปที่ 4.71 เครื่องเชื่อมและหัวเชื่อมของการเชื่อมสตั๊ดแบบปล่อยประจุ (CD stud welding)

4.5 กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทาน (Friction Welding : FRW)

Eder paduan Alves (2012) ได้กล่าวถึงกรรมวิธีการเชื่อมวิธีนี้ว่า เป็นการเชื่อมที่อาศัยหลักการของแรงเสียดทานหรือบางครั้งเรียกว่าแรงเสียดสีของวัสดุที่ต้องการที่จะเชื่อมต่อกันมาสัมผัสกัน โดยปราศจากพลังงานไฟฟ้า ปราศจากการอาร์ก แต่อาศัยความร้อนเพื่อการหลอมเชื่อมต่อกันด้วยแรงเสียดทานทางกล (Friction mechanical) ดังองค์ประกอบของขบวนการเชื่อมในรูปที่ 4.72 ซึ่งมีลำดับขั้นตอนของการเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.73 ดังคำอธิบายของหลักการปฏิบัติการในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.72 ระบบวิธีการเชื่อมเสียดทาน (Friction welding process)

ที่มา : Eder Paduan Alves : J. Aerosp. Technol. Manag. Vol. 4 No.1, 2012

ขั้นตอนวิธีการเชื่อมเสียดทาน (Step of friction welding process)

ลำดับขั้นตอนของขบวนการเชื่อมที่อาศัยความร้อนจากแรงเสียดทานนี้มี 4 ขั้นตอน ไม่ว่าจะเป็นวัสดุชนิดหรือประเภทใด เช่น โลหะกลุ่มเหล็ก/นอกลกลุ่มเหล็ก และรูปทรงของวัสดุเป็นแบบใด เช่น เป็นรูปแท่งทรงกลม แผ่นเรียบ แท่งเหลี่ยม หรือรูปทรงระบอก จะแตกต่างกันเฉพาะปัจจัยการเชื่อมเท่านั้น โดยขั้นตอนปฏิบัติการเชื่อม ดังนี้

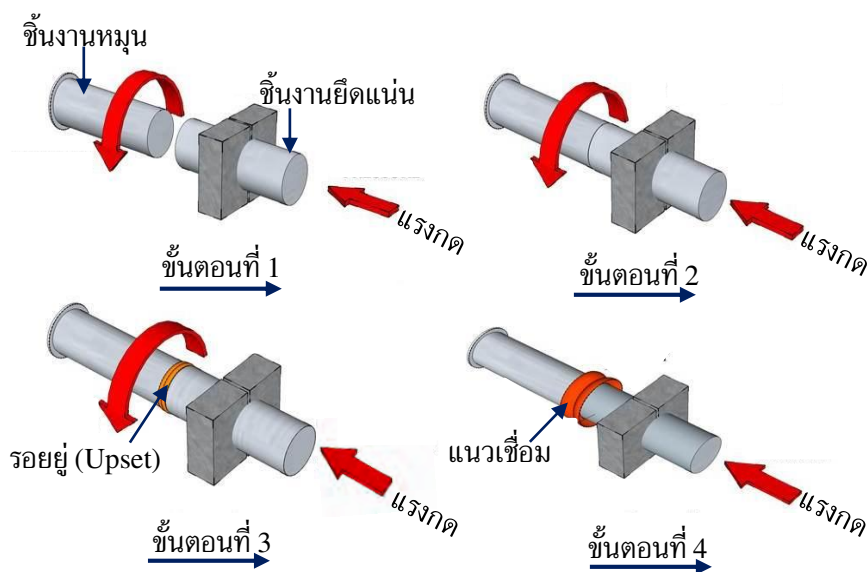
ขั้นตอนที่ 1 นำชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมที่ผ่านการเตรียมผิวหน้าสำหรับการต่อชน (Butt joints) ทั้งสองชิ้นมาจับยึดบนเครื่องเชื่อม (อาจเป็นเครื่องจักรกลประยุกต์) โดยชิ้นงานที่เชื่อมหนึ่งชิ้นจับยึดกับหัวจับด้านไม่เคลื่อนที่ (Non-rotating) กับอีกชิ้นหนึ่งชิ้นจับยึดกับหัวจับด้านเคลื่อนที่ (Rotating) จากนั้นปรับตั้งปัจจัยของการเชื่อมที่ชุดควบคุมการเชื่อม ซึ่งประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลัก คือ ความเร็วรอบของการเคลื่อนที่ (Rotation speed : rpm) ความเร็วในการเชื่อม (Welding speed : mm/min) และแรงกด (Pressure/Down force : Nm) โดยเริ่มทำการเชื่อมด้วยการเคลื่อนชิ้นงานเข้าหากัน

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อชิ้นงานด้านหมุนเคลื่อนที่สัมผัสกับชิ้นงานด้านคงที่ จากทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตรงกันข้ามจึงเกิดการเสียดสีกันของผิวหน้าชิ้นงาน ขณะเดียวกันมีการเพิ่มแรงกดกับชิ้นงานจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นและจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อปริมาณความร้อนจากการเสียดทาน/เสียดสีสูงมากพอที่จะทำให้เนื้อโลหะบริเวณผิวหน้าสัมผัสเกิดการอ่อนตัวจนเกือบหลอมเหลว (Non-melting) เนื้อโลหะส่วนที่อ่อนตัวจะผสมผสานกันโดยมีแรงช่วยกดอัดตลอดเวลา

ขั้นตอนที่ 4 เป็นขั้นตอนที่ชิ้นงานด้านหมุนเคลื่อนที่หยุดทำงาน จะมีเพียงชิ้นงานด้านจับยึดคงที่ถูกอัดด้วยแรงเพื่อให้เนื้อโลหะที่ผสมผสานติดกันแน่นมากยิ่งขึ้น และเย็นตัวได้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์ โดยแนวเชื่อมอาจเกิดระยะรอยอยู่ (Total of upset length) มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแต่ละปัจจัยการเชื่อมหรือแต่ละชนิดของวัสดุโลหะเชื่อมซึ่งระยะอยู่ (Upset) บางลักษณะงานจะมีการกำจัดออกไป

จากคำอธิบายของแต่ละขั้นตอนของกระบวนการเชื่อมดังกล่าวข้างต้น สามารถสร้างเป็นแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละลำดับขั้นตอนเพื่อความสะดวกต่อการเข้าใจ และแสดงถึงลำดับความสัมพันธ์กันของปัจจัยการเชื่อมในระหว่างกระบวนการเชื่อมได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.74

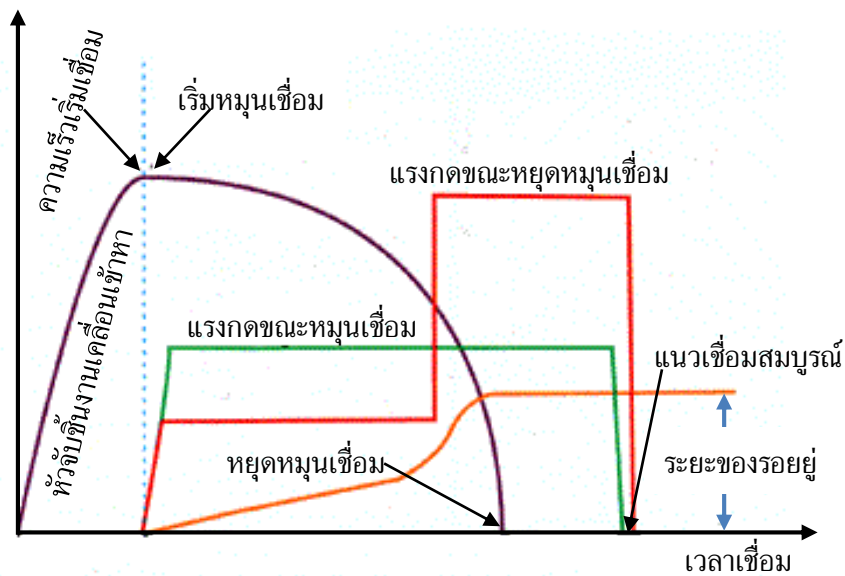


รูปที่ 4.73 ขั้นตอนวิธีการเชื่อมเสียดทาน (Step of friction welding process)

ที่มา : Anonio M. Mateo Garcia, *Advances Gas Turbine Technology*, 2011

เทคนิคของวิธีการเชื่อมเสียดทาน (Technic of friction welding process)

F Khalfallah et al. (2020) ได้กล่าวถึงเทคนิคการเชื่อมเสียดทานว่านิยมเชื่อมต่อกับวัสดุโลหะที่มีสมบัติอ่อนตัวได้ดี และเหมาะกับการเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding) โดยเฉพาะโลหะที่มีปัญหาเกิดข้อบกพร่องได้ง่ายจากการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Melting welding process) หรือโลหะต่างชนิดที่มีจุดหลอมเหลวต่างกันมาก เป็นต้น จากการศึกษาค้นคว้าถึงพัฒนาการด้านเทคโนโลยีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน พบว่า ปัจจุบันเทคนิคการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ ประเภทที่ต้องใช้เครื่องมือ (Tool welding) กับประเภทที่ไม่ต้องใช้เครื่องมือ (Non-tool welding) ดังรายละเอียดเพิ่มเติม ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.74 ความสัมพันธ์ขณะเชื่อมของปัจจัยการเชื่อมเสียดทาน

ที่มา : F. Khalfallah , *International Review of Applied Sciences and Engineering*. Vol. 11, 2020

เทคนิคการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน เป็นเทคนิคที่เกิดจากการประยุกต์ใช้งานของช่างเชื่อมที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม เช่น เป็นชิ้นงานโลหะแผ่นเรียบ ชิ้นงานแท่งกลม/แท่งเหลี่ยม หรือชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมต่อเกย (Lap joint) เป็นต้น ซึ่งเทคนิคที่สามารถพบเห็นและนิยมใช้เชื่อมงานกันในปัจจุบัน มี 4 วิธี โดยจะได้อธิบายความแตกต่างกันของแต่ละเทคนิคการเชื่อมดังต่อไปนี้

1. เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding : FSW) ดังแสดงองค์ประกอบของขบวนการเชื่อมในรูปที่ 4.75 (ก) เป็นเทคนิคการเชื่อมแบบแรกดั้งเดิมของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในชื่อว่าการเชื่อมแบบกวน (Stir welding) เพราะเทคนิคการเชื่อมนี้จะมีเครื่องมือ (Tool) เป็นตัวกวน โดยที่ปลายของเครื่องมือมีหัวกวน (Probe/Pin) ทำหน้าที่กวนเนื้อโลหะให้เกิดการอ่อนตัวจนเกือบหลอมละลายและผสมผสานกัน ซึ่งลักษณะรูปทรงของหัวกวนมีการออกแบบที่หลากหลาย เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะของงานที่ต้องการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.75 (ข) เทคนิคการเชื่อมนี้จะเหมาะกับการเชื่อมต่อชน (Butt joint) ชิ้นงานโลหะแผ่นเรียบ

ลำดับขั้นตอนของการเชื่อมแบบ FSW มี 4 ขั้นตอนหลักสำคัญ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.75 (ค) กล่าวคือ **ขั้นตอนที่ 1** นำโลหะชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมจับยึดแน่นคงที่บนเครื่องจักร โดยหัวกวนจับยึดอยู่กับแกนเพลาลมที่สามารถหมุนได้ (Rotating) และเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงานเชื่อมได้ด้วยอาศัยกำลังของเครื่องจักร ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่คือทิศทางการเชื่อม (Welding direction)

ขั้นตอนที่ 2 เคลื่อนหัวกวนเข้าหาชิ้นงานโลหะ และกดหัวกวนลงในช่องว่างระหว่างรอยต่อบนชิ้นงานเชื่อม (Plunging) ซึ่งที่หัวกวนกำลังหมุนจะเกิดแรงเสียดสีกันหรือเสียดทานกัน และเริ่มเกิดความร้อนขึ้นและจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ

ขั้นตอนที่ 3 เนื้อโลหะที่ร้อนอ่อนตัวจนเกือบหลอม ในขณะที่หัวกวนหมุนก็จะนำเอาเนื้อโลหะกวนมาผสมผสานกันจนเกิดได้เป็นบริเวณแนวเชื่อมตามขนาดของหัวกวน (Welding) ขั้นตอนนี้หัวกวนจะหมุนกวนไปอย่างต่อเนื่องตลอดความยาวของตำแหน่งงานที่ต้องการเชื่อม

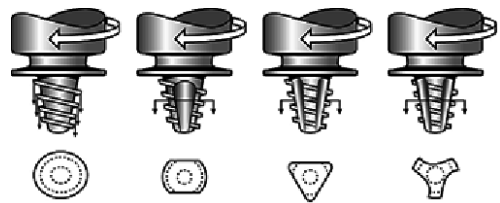
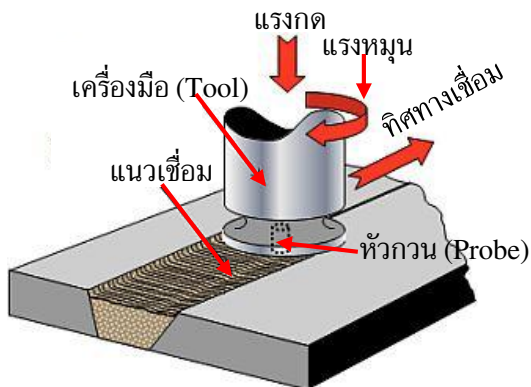
ขั้นตอนที่ 4 เมื่อสิ้นสุดตำแหน่งงานที่ต้องการเชื่อมหัวกวนจะถูกเครื่องจักรถอยแรงกดออกชิ้นงาน (Pull off) ก็จะได้ชิ้นงานเชื่อมติดกัน โดยปกติที่จุดสิ้นสุดการกวนมักเกิดเป็นรูของหัวกวนที่เรียกว่า Keyhole ซึ่งถือเป็นข้อบกพร่อง ดังนั้น ต้องเคลื่อนหัวกวนให้เลยตำแหน่งของปลายสุดของชิ้นงานที่ต้องการออกไปเล็กน้อย

สำหรับปัจจัยของการเชื่อมด้วยเทคนิคการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (FSW) ต้องพิจารณาถึงปัจจัยหลัก 3 ส่วนสำคัญ คือ วัสดุ (Materials) เครื่องมือ/หัวกวน (Tool/Probe) และเครื่องจักรต้นกำลัง (Machine) ดังแสดงใน**ตารางที่ 4.15**

ตารางที่ 4.15 ปัจจัยการเชื่อมด้วยเทคนิคการเชื่อมด้วยเสียดทานแบบกวนที่ต้องพิจารณา

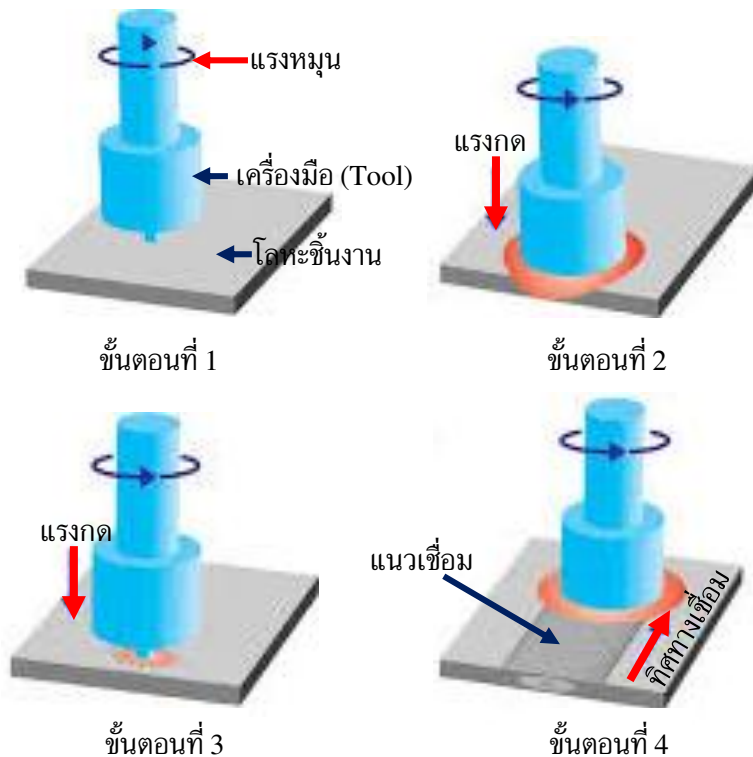
ที่มา : วรพจน์ ศิริรักษ์ และคณะ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 23 (3) 64-82 2016

| วัสดุ (Materials) | เครื่องมือ/หัวกวน (Tool/Probe) | เครื่องจักรต้นกำลัง (Machine) |
|---|---|--|
| <p>ปัจจัยที่ต้องพิจารณา</p> <p>1. ชนิดของวัสดุ (Type of materials) การเชื่อมกรรมวิธีนี้สามารถเชื่อมได้ทั้งโลหะนอกกลุ่มเหล็กและกลุ่มเหล็กแต่จะนิยมเชื่อมโลหะที่มีสมบัติอ่อนเหนียว</p> <p>2. ความหนาของวัสดุ (Thickness) ที่ต่างกันมีผลต่อการปรับปรุงการเชื่อม</p> <p>3. การเชื่อมต่อสามารถเชื่อมได้ทั้งวัสดุชนิดเดียวกัน (Similar) และต่างชนิดกัน (Dissimilar)</p> | <p>ปัจจัยที่ต้องพิจารณา</p> <p>1. การออกแบบรูปทรงของหัวกวน ซึ่งมีหลากหลายแบบ ได้แก่</p> <ul style="list-style-type: none"> - ทรงกรวย - ทรงกรวยเกลียว - ทรงกระบอก - ทรงกระบอกเกลียว - ทรงสี่เหลี่ยม - ทรงสามเหลี่ยม <p>2. เครื่องมือ (Tool)</p> <ul style="list-style-type: none"> - วัสดุทำเครื่องมือ - ขนาดของบ่าเครื่องมือ (Shoulder tool size) - ขนาดของหัวกวน (Probe size) | <p>ปัจจัยที่ต้องพิจารณา</p> <ul style="list-style-type: none"> 1. ความเร็วรอบหมุนของเครื่องจักร (rpm) 2. ความเร็วเดินเชื่อม (mm/min) 3. แรงกดแนวแกน (kN) 4. ระยะกดลึก (mm) 5. มุมเอียงเครื่องมือกวน ($^{\circ}$) |



(ข) ชนิดของหัวกวนการเชื่อมแบบ FSW
ที่มา : FSW: Development & Trends, 2013

(ก) กรรมวิธีการเชื่อมแบบ FSW
ที่มา : Friction Stir Welding Seminar Report, 2017



(ค) ขั้นตอนของการเชื่อมแบบ FSW

ที่มา : Metallo., Micro. and Analysis 8: 713-725, 2019

รูปที่ 4.75 เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding : FSW)

2. เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction stir spot welding : FSSW) Daniela Lohwasser et al. (2010) กล่าวถึงเทคนิคการเชื่อมวิธีนี้ว่ามีขบวนการเชื่อมและองค์ประกอบของการเชื่อมที่คล้าย

กับเทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) โดยมีเครื่องจักรเป็นต้นกำลังของการหมุน (Rotating) กับการกด (Press) ตัวเครื่องมือจะแตกต่างกันที่วิธีนี้ตัวเครื่องมือ (Tool) ไม่ได้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง (Non linear movement) แต่จะเคลื่อนที่ขึ้นลงเป็นตำแหน่งจุด (Spot) ดังแสดงองค์ประกอบของ ขบวนการเชื่อมในรูปที่ 4.76 (ก) และนอกจากนี้ลักษณะของตัวเครื่องมือจะแตกต่างกันเล็กน้อยตรงส่วนของปลายหัวกวน (Pin) ปลายจะยาวลึกลงกว่าเพราะนิยมใช้กับการเชื่อมโลหะแผ่นแบบต่อเกย (Lap joint) ลักษณะรูปทรงของหัวกวนที่นิยมกันมีทั้งแบบทรงกระบอกตรง (Straight cylindrical) แบบ ทรงกระบอกเรียว (Tapered cylindrical) และสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) แสดงในรูปที่ 4.76 (ข)

ขั้นตอนของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุด (FSSW) ซึ่งโดยขั้นตอนพื้นฐานของขบวนการเชื่อม ที่จุดเดียว มี 3 ลำดับขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 4.76 (ค)

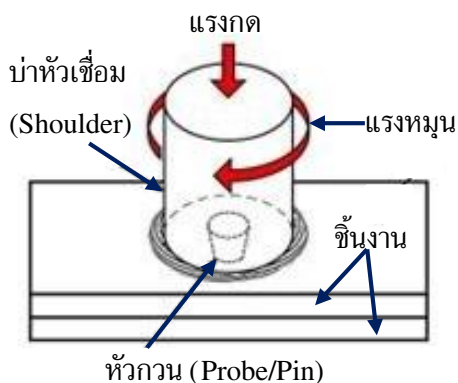
ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนนี้เรียกว่า “Plunging” นำโลหะชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมวางเกยทับกันพร้อมกับการจับยึดบนฐานรองของเครื่องจักรที่ใช้เชื่อม จากนั้นก็เริ่มหมุนหัวกวน (Rotation) พร้อมกับการใช้แรงกด (Pression) ให้เคลื่อนเข้าหาโลหะชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนนี้เรียกว่า “Stirring” โลหะชิ้นงานแผ่นบนที่โดนกวนก่อนก็จะเกิดความร้อน และอ่อนตัวจนเกือบหลอมเหลวก่อน โดยจะต่อเนื่องไปจนถึงโลหะชิ้นงานแผ่นล่าง ซึ่งรัศมีของความร้อนจะเท่ากับขนาดความกว้างของหัวกวน ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการผสมผสานของเนื้อโลหะที่อ่อนตัว เป็นเนื้อเดียวกัน

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนนี้เรียกว่า “Drawing out” ขั้นตอนนี้จะหยุดการหมุนกวนแล้วร่อนเนื้อโลหะ เย็นตัวจากนั้นก็ถอยแรงกดออกจากชิ้นงานก็จะได้เป็นแนวเชื่อมแบบจุด (Spot weldment) ที่สมบูรณ์

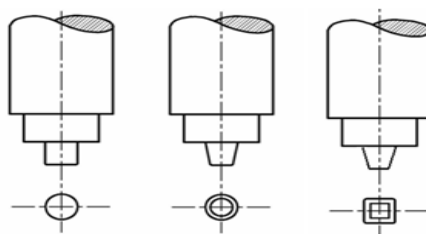
แนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุด (FSSW) โดยปกติที่จุดกึ่งกลางของจุดเชื่อม จะมีลักษณะที่เป็นรู/หลุม (Keyhole) เกิดขึ้นเสมอโดยเกิดจากอิทธิพลของหัวกวนที่ถอยออกหลังจาก เนื้อโลหะเย็นตัวไปแล้ว ดังแสดงลักษณะของรอยเชื่อมดังกล่าวในรูปที่ 4.77 (ก) ซึ่งสำหรับแนวเชื่อม ของชิ้นส่วนบางประเภทถือว่าเป็นรอยตำหนิหรือผิวชิ้นงานไม่สวยงาม ที่เป็นขีดจำกัดของการเชื่อมวิธีนี้ ในวงการเทคโนโลยีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานได้พยายามพัฒนาคิดค้นและแก้ปัญหา จึงเกิดเทคนิค การเชื่อมใหม่ขึ้นที่แนวเชื่อมจุดจะเต็มเต็มและไม่เกิดเป็นรู/หลุม ดังแสดงลักษณะของรอยเชื่อมดังกล่าว ในรูปที่ 4.77 (ข) เรียกเทคนิคการเชื่อมนี้ว่า การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจุดแบบเติม (Refill friction stir spot welding : Refill-FSSW) แนวเชื่อมที่ได้จะเกิดจากการอัดให้เนื้อโลหะที่อ่อนตัวไหลไปเติม เต็ม (Refill) ด้วยเครื่องมือ (Tool) ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ บ่าเครื่องมือ (Shoulder of tool) กับ หัวกวนเครื่องมือ (Probe of tool) ซึ่งทั้งคู่จะหมุนและอิสระต่อกัน โดยมี 2 วิธีการเชื่อม คือ

1. วิธีการอัดเนื้อโลหะเต็มเต็มด้วยบ่าเครื่องมือ (Shoulder tool) วิธีนี้ใช้ส่วนของบ่า (Shoulder) ทำหน้าที่หมุนเพื่อสร้างแรงเสียดทานให้เกิดความร้อน เมื่อเนื้อโลหะทั้งสองชิ้นที่จะต่อกันอ่อนตัว ส่วนของ หัวกวน (Probe) จะหมุนพร้อมอัดเนื้อโลหะให้หลอมติดแน่นกัน ซึ่งเป็นขณะเดียวกันที่ตัวบ่าเคลื่อนที่ขึ้น



(ก) กรรมวิธีการเชื่อมแบบ FSWW

ที่มา : TWI, Friction welding process, 2015



(ข) ชนิดของหัวแกนการเชื่อมแบบ FSWW

ที่มา : Journal of Mechanical Engineering and Automation 2(4) : 74-79, 2012



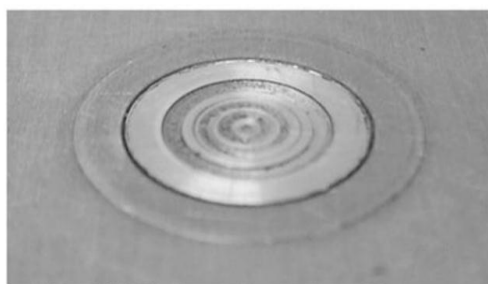
(ค) ขั้นตอนของการเชื่อมแบบ FSWW

ที่มา : Metallo, Micro. and Analysis 8: 713-725, 2019

รูปที่ 4.76 เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction stir spot welding : FSSW)



(ก) แนวเชื่อมของการเชื่อมแบบ FSSW



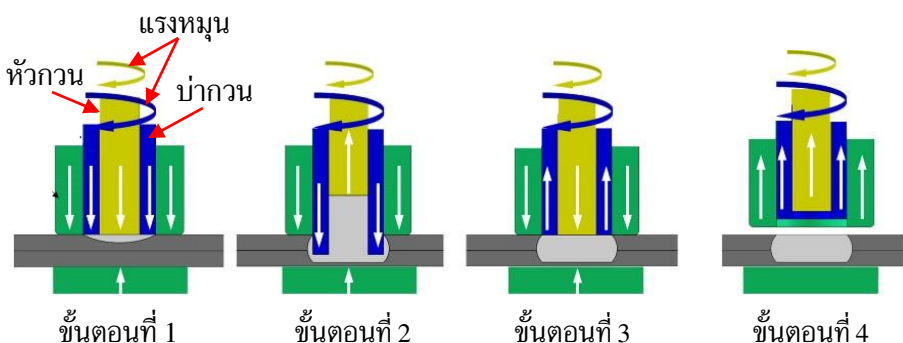
(ข) แนวเชื่อมของการเชื่อมแบบ Refill-FSSW

รูปที่ 4.77 เปรียบเทียบลักษณะแนวเชื่อมแบบ FSSW กับแบบ Refill-FSSW

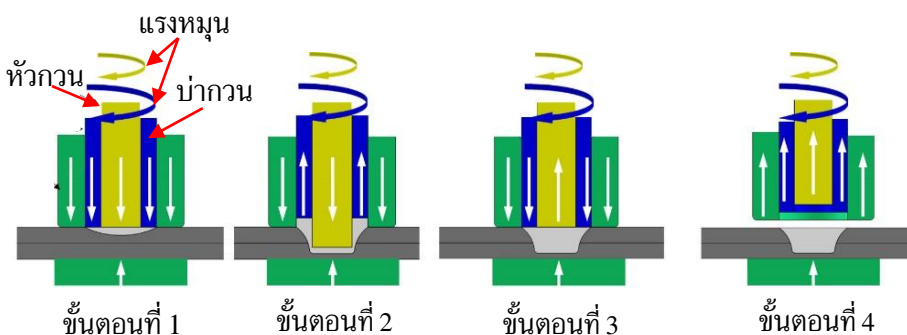
ที่มา : Y. Chen, Refill friction stir spot welding of dissimilar alloys. Materials Science, 2015

สวนทางกันเพื่อเปิดช่องพื้นที่ให้เนื้อโลหะไหลได้เต็มพื้นที่เชื่อม เมื่อเนื้อโลหะเย็นตัวก็จะถอยเครื่องมือทั้งคู่ออกจะได้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์ ดังแสดงลำดับขั้นตอนดังกล่าวในรูปที่ 4.78 (ก)

2. วิธีการอัดเนื้อโลหะเติมเต็มด้วยหัวกวนเครื่องมือ (Probe) วิธีนี้ใช้ส่วนของหัวกวนเป็นตัวทำหน้าที่หมุนสร้างความร้อนจากการเสียดทาน เมื่อเนื้อโลหะทั้งสองชิ้นอ่อนตัว ตัวกวนจะเคลื่อนอัดพร้อมหมุนให้เนื้อโลหะที่ผสมผสานกันแล้วไหลตัว ซึ่งเป็นขณะเดียวกันที่ตัวหัวกวนจะถอยออกเพื่อสร้างพื้นที่ว่างให้เนื้อโลหะไหลได้เต็มพื้นที่รอยเชื่อม หลังจากเนื้อโลหะเย็นตัวลงตัวของเครื่องมือทั้งคู่ก็ถอยออก จะได้แนวเชื่อมที่เต็มพื้นที่สมบูรณ์ ดังแสดงขั้นตอนดังกล่าวในรูปที่ 4.78 (ข)



(ก) ขั้นตอนการเชื่อมแบบ Refill-FSSW ด้วยวิธี Shoulder-plunge



(ข) ขั้นตอนการเชื่อมแบบ Refill-FSSW ด้วยวิธี Probe-plunge

รูปที่ 4.78 ขั้นตอนการเชื่อมแบบ Refill-FSSW วิธี Shoulder-plunge กับ Probe-plunge

ที่มา : TWI : Refill Friction Stir Spot Welding, 2017

การประยุกต์ใช้งานการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจุดแบบเติม (Refill friction stir spot welding : Refill-FSSW)

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจุดแบบเติม (Refill-FSSW) นิยมใช้เชื่อมโลหะอลูมิเนียมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนมา เชื่อมได้ทั้งอลูมิเนียมเกรดเดียวกัน (Similar grade) หรือต่างเกรดกัน (Dissimilar grade) หรือวัสดุต่างชนิดกัน (Dissimilar materials) เป็นสำคัญ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุด (FSSW) มีข้อดี ดังต่อไปนี้

- แนวเชื่อมไม่เกิดข้อบกพร่องที่เป็นรู/หลุมที่ผิวหน้าชิ้นงาน ผิวงานเชื่อมจะเต็มพื้นผิว
- อุณหภูมิการเชื่อมต่ำ ลดการบิดเบี้ยวและหดตัวได้ดี
- สามารถซ่อมโลหะอุณหภูมิเนียมเกรดที่ไม่สามารถเชื่อมแบบหลอมละลายได้
- สามารถเชื่อมโลหะได้หนามากกว่า
- ขบวนการเชื่อมเหมาะกับการเชื่อมแบบอัตโนมัติ (Automation welding)
- เหมาะสำหรับการเชื่อมชิ้นส่วนเครื่องบิน เช่น Fuselage และ Wing structure

3. เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบเส้นตรง (Linear friction welding : LFW) Nimal S. Kalsi et al. (2011) ได้นำเสนอถึงเทคนิคการเชื่อมแบบเชิงเส้นนี้ว่า อาศัยหลักการของแรงเสียดสี/เสียดทานกันของผิวชิ้นงานแบบสั่น (Oscillation) ภายใต้สภาวะของแรงกดที่สูง จนเนื้อโลหะชิ้นงานที่เชื่อมเกิดความร้อนและทำให้โลหะเกิดการอ่อนตัว โลหะชิ้นงานจะสั่นลงตามทิศทางแรงอัด อิทธิพลของแรงอัดทำให้โลหะที่อ่อนตัวไหลไปทั่วรอยต่อของชิ้นงาน และมีบางส่วนไหลออกมาที่ขอบของชิ้นงานครอบคลุมขอบรอยต่อทั้งหมด และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงชิ้นงานจะเชื่อมติดกันสนิทเป็นแนวเชื่อมที่สมบูรณ์ ดังแสดงองค์ประกอบของการเชื่อมในรูปที่ 4.79 (ก)

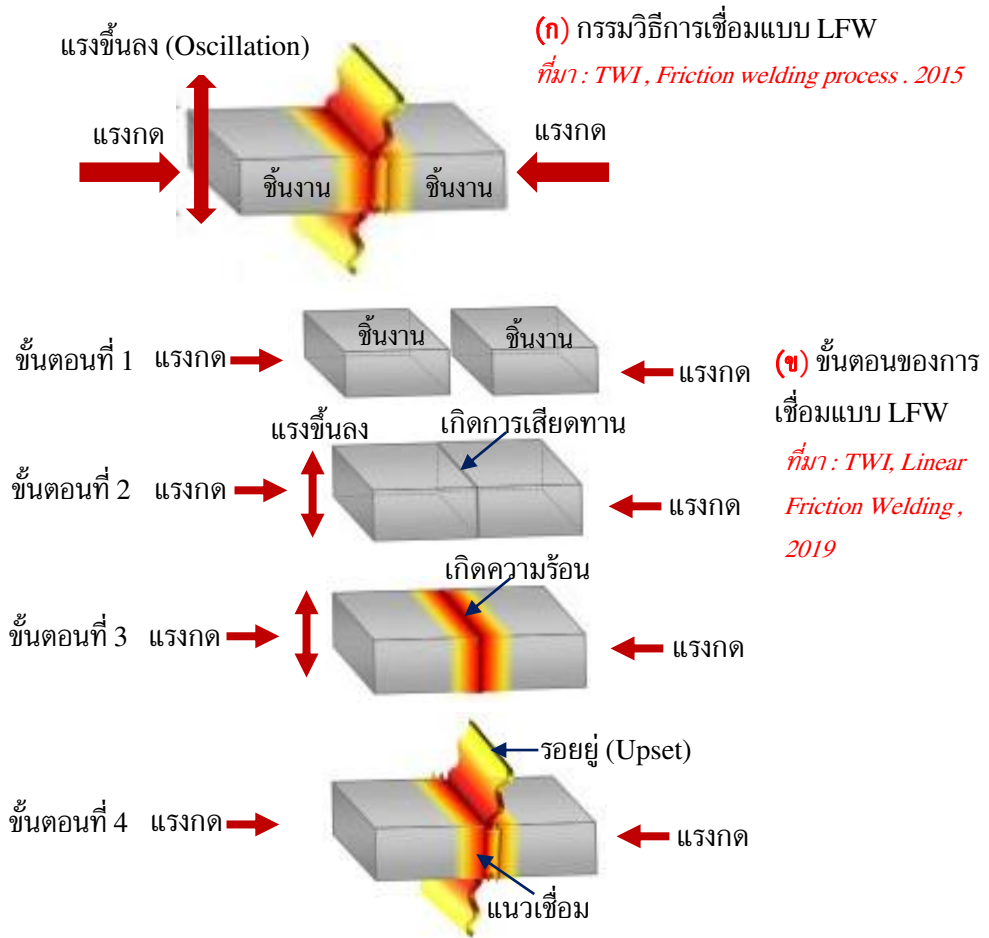
เทคนิคการเชื่อมแบบนี้สามารถเชื่อมได้ทั้งวัสดุที่เป็นประเภทโลหะ (Metals) ประเภทพลาสติก (Plastics) และประเภทไม้ (Wood) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหมาะกับวัสดุโลหะที่มีคุณสมบัติต้านทานแรงดัดกับแรงเฉือนได้ดี และมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ ขบวนการเชื่อมนี้ทำให้เกิดความร้อนได้อย่างรวดเร็วและคงที่โดยการเชื่อมด้วยเทคนิคนี้จะเชื่อมได้ดีกับวัสดุชนิดที่มีสมบัติเหมือนกันหรือใกล้เคียงกันมากกว่าวัสดุต่างชนิดกัน เหตุผลเพราะต้องอาศัยอัตราการเกิดความร้อนและการอ่อนตัวที่พร้อมกันจากวัสดุชิ้นงานเองโดยตรงไม่มีตัวเครื่องมือ (Tool) มาช่วยสร้างความร้อนแต่จะอาศัยแรงกดอัดที่สูงมาก ดังอธิบายถึงขั้นตอนของการเชื่อมด้วยภาพประกอบในรูปที่ 4.79 (ข)

ขั้นตอนที่ 1. นำชิ้นงานที่ต้องเชื่อมทั้งสองชิ้นจับยึดเข้ากับหัวจับ (Chuck) ขึ้นละช้า โดยปากจับจะเคลื่อนชิ้นงานเข้าหากันเพื่อสัมผัสและสร้างแรงเสียดทานในแนวแกน

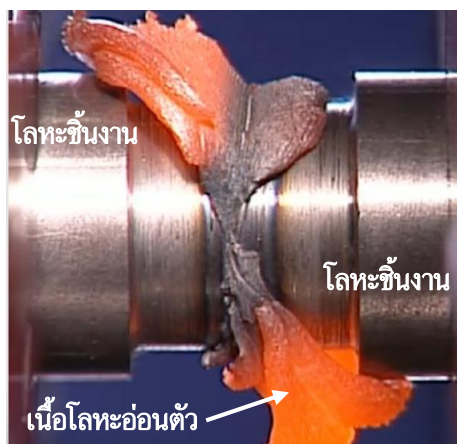
ขั้นตอนที่ 2. เมื่อผิวหน้าของชิ้นงานสัมผัสกันสนิท หัวจับชิ้นงานจะเริ่มสั่นขึ้นลง (Oscillation) ภายใต้แรงกดที่มากแรงเสียดทานจะเพิ่มสูงขึ้นจนเริ่มเกิดความร้อน

ขั้นตอนที่ 3. ภายใต้สภาวะแรงเสียดทานขึ้นลงและแรงกดที่สูงมาก ชิ้นงานเกิดความร้อนจนอ่อนตัวในระดับสถานะเกือบหลอมละลาย

ขั้นตอนที่ 4. เมื่อเนื้อวัสดุอ่อนตัวจะลดแรงเสียดทานลง แต่เพิ่มแรงกดอัดจนเนื้อวัสดุไหลไปทั่วผิวหน้าสัมผัสของทั้งสองชิ้นและไหลล้นออกมาครอบคลุมขอบรอยต่อรอบด้าน ขั้นตอนนี้ความยาวของชิ้นงานจะลดลง ด้วยเพราะเนื้อวัสดุอ่อนตัวและไหลออกไปเรียกว่า รอยยุบ (Upset) เมื่อเนื้อวัสดุเย็นตัวจะเกิดการเชื่อมผสานเป็นเนื้อเดียวกัน โดยเนื้อวัสดุที่ล้นออกมาสามารถกำจัดออก หรือไม่กำจัดออกก็ได้ตามความเหมาะสมของการนำชิ้นงานไปใช้ ดังแสดงตัวอย่างชิ้นงานขณะทำการเชื่อมในรูปที่ 4.80 (ก) และตัวอย่างการเชื่อมวัสดุไทเทเนียมผสมที่ในรูปที่ 4.80 (ข)



รูปที่ 4.79 เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบเส้นตรง (Linear friction welding : LFW)



(ก) การไหลของเนื้อโลหะขณะเชื่อม
ที่มา : How Friction Welding works. 2014

(ข) ตัวอย่างชิ้นงานโลหะที่ผ่านการเชื่อม
ที่มา : ACB, Linear Friction Welding. 2016

รูปที่ 4.80 ตัวอย่างการไหลของเนื้อโลหะและชิ้นงานของการเชื่อมแบบเส้นตรง (LFW)

4. เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบหมุน (Rotary friction welding : RFW) M.C. Chaturvedi (2012) ได้กล่าวถึงเทคนิคการเชื่อมแบบนี้ว่า เป็นขบวนการเชื่อมที่คล้ายกับการเชื่อมแบบเส้นตรง จะต่างกันที่ทิศทางการหมุนของแรงที่ทำให้เกิดการเสียดทานบนผิวของชิ้นงาน โดยเทคนิคการเชื่อมขบวนการนี้จะใช้แรงเสียดทานหมุนแบบเป็นวงกลม (Rotating) ซึ่งเทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบหมุนนี้มีรูปแบบการหมุนขณะทำการเชื่อม 2 แบบ คือ

ก. การเชื่อมหมุนแบบต่อเนื่อง ซึ่งเรียกกันว่า Continuous drive rotary friction welding หรือ Continuous drive RFW ดังแสดงในรูปที่ 4.81 (ก) เป็นการหมุนเชื่อมปกติที่นิยมใช้กัน จะใช้เชื่อมกับชิ้นงานทรงกลมตัน (Cylindrical bar) เป็นส่วนใหญ่ ขณะทำการเชื่อมชิ้นงานจะมีรูปแบบอัตราความเร็วการหมุนอย่างต่อเนื่องตลอดการเชื่อม

ข. การเชื่อมหมุนแบบอาศัยแรงเฉื่อย ซึ่งเรียกกันว่า Inertia rotary friction welding หรือ Inertia RFW ดังแสดงในรูปที่ 4.81 (ข) การหมุนเชื่อมแบบนี้ชิ้นงานเชื่อมจะหมุนด้วยแรงเฉื่อยหรือพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ที่เกิดจากแรงเฉื่อยบนมูเล่ (Flywheel) ที่จับยึดชิ้นงานไว้แล้วนำมาสร้างแรงเสียดทานจนเกิดเป็นความร้อนขึ้น

ลำดับขั้นตอนของการเชื่อมทั้ง 2 รูปแบบการหมุนคล้ายกัน มีเพียงบางขั้นตอนที่แตกต่างกัน โดยอ้างอิงขั้นตอนหลัก ๆ ของการเชื่อมหมุนแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.81 (ค) โดยมีลำดับขั้นตอนหลักของขบวนการเชื่อม พร้อมคำอธิบายของแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

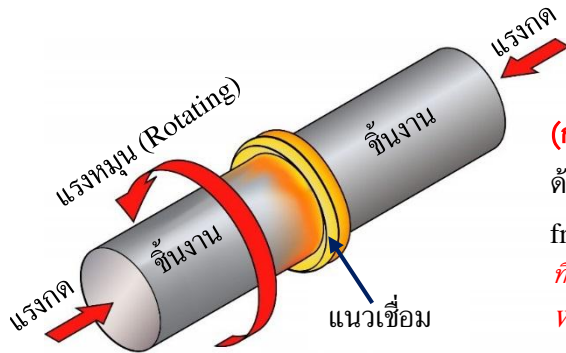
ขั้นตอนที่ 1. นำชิ้นงานโลหะที่ต้องการเชื่อมทั้งสองชิ้นไปจับยึด โดยหนึ่งชิ้นจับยึดกับหัวจับที่หมุนได้ กับอีกหนึ่งชิ้นจับยึดกับหัวจับที่ยึดแน่น จากนั้นด้านหมุนจะหมุนชิ้นงานด้วยแรงของเครื่องจักรในทิศทางตามเส้นรอบวงของชิ้นงาน ส่วนด้านยึดแน่นจะเคลื่อนที่ชิ้นงานเข้าหากันอย่างช้า ๆ ด้วยแรงดันที่สูงมาก

ขั้นตอนที่ 2. เมื่อชิ้นงานเคลื่อนที่จนผิวหน้าสัมผัสกันก็จะเกิดแรงเสียดทานขึ้น และเกิดเป็นความร้อนที่บริเวณหน้าสัมผัสของชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 3. ความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้นในเวลาอันสั้นจนทำให้เนื้อโลหะชิ้นงานอ่อนตัว ซึ่งยังอยู่ภายใต้สภาวะแรงกดตลอดเวลา ในขั้นตอนนี้ความยาวของชิ้นงานเชื่อมลดลง เนื่องจากเนื้อโลหะอ่อนตัวไหลออกจากหน้าสัมผัสด้วยแรงกด

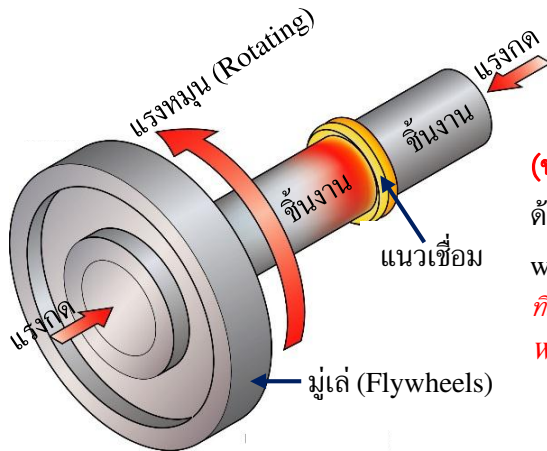
ขั้นตอนที่ 4. หัวจับหยุดหมุนแต่แรงกดคงที่แซ่ไว้จนกว่าเนื้อโลหะจะเย็นตัว จึงจะถอยแรงกดออก

ข้อแตกต่างสำหรับการเชื่อมหมุนแบบอาศัยแรงเฉื่อย ใช้หลักการหมุนของมูเล่จนถึงความเร็วสูงสุดตามที่กำหนดไว้ จากนั้นก็ปลดแรงขับปล่อยให้มูเล่ซึ่งจับยึดชิ้นงานไว้หนึ่งข้างหมุนไปเองด้วยแรงเฉื่อย (พลังงานจลน์) โดยเป็นเวลาเดียวกันกับการเคลื่อนที่ชิ้นงานอีกข้างเข้ามาหา เช่นเดียวกับการเชื่อมแบบหมุนต่อเนื่อง ขั้นตอนต่อไปก็เหมือนกันเมื่อพิจารณาถึงปัจจัยการเชื่อม (Welding parameters) ของทั้งสองแบบ พบว่า มีความแตกต่างกันในบางปัจจัย ดังแสดงเปรียบเทียบด้วยกราฟในรูปที่ 4.82 และเพื่อเพิ่มความเข้าใจที่ดียิ่งขึ้น จึงได้นำตัวอย่างการเชื่อมชิ้นงานจริงของการเชื่อมหมุนแบบต่อเนื่อง และการเชื่อมหมุนแบบอาศัยแรงเฉื่อยมาเปรียบเทียบกัน ดังในรูปที่ 4.83 และ รูปที่ 4.84 ตามลำดับ



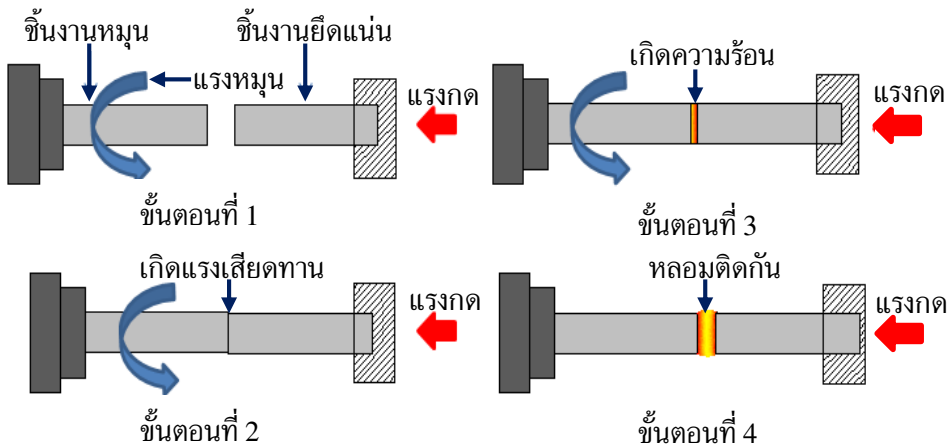
(ก) กรรมวิธีการเชื่อมแบบ RFW
ด้วยวิธี Continuous drive rotary
friction welding

ที่มา : TWI, Rotary Friction
Welding . 2015



(ข) กรรมวิธีการเชื่อมแบบ RFW
ด้วยวิธี Inertia rotary friction
welding

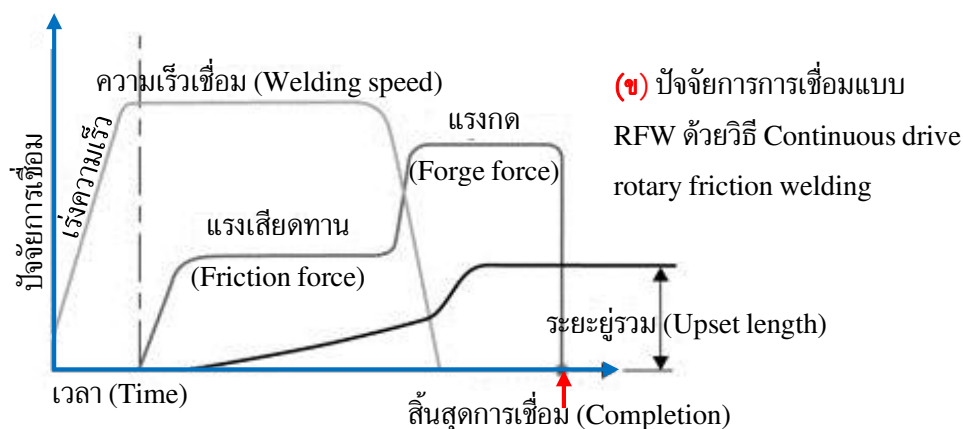
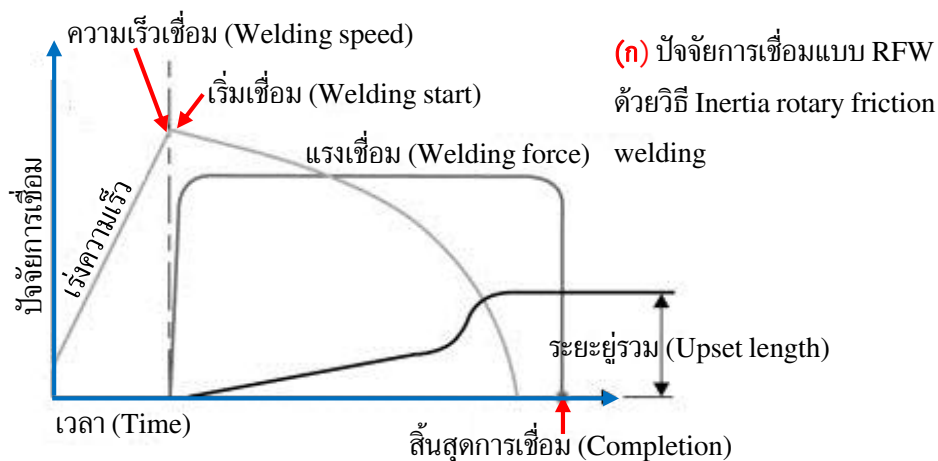
ที่มา : TWI, Rotary Friction
Welding . 2015



(ค) ขั้นตอนของการเชื่อมแบบ RFW

ที่มา : TWI, Linear Friction Welding , 2015

รูปที่ 4.81 เทคนิคการเชื่อมแบบ (Rotary friction welding : RFW)



รูปที่ 4.82 เปรียบเทียบปัจจัยการเชื่อมแบบ Inertia RFW กับแบบ Continuous drive RFW

ที่มา : *Welding and Joining of Aerospace Materials, 2 Edition, pp 21–65, 2012*



(ก) การไหลของเนื้อโลหะขณะเชื่อม

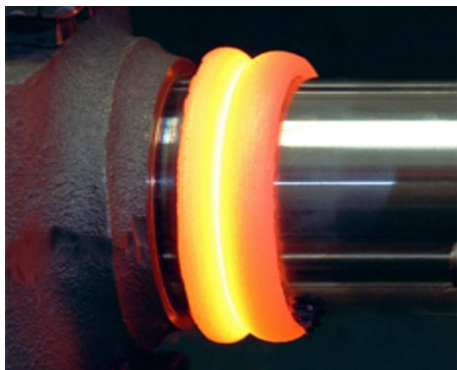
ที่มา : *Navya S.: Rotary Friction Welding, 2017*



(ข) ตัวอย่างชิ้นงานโลหะที่ผ่านการเชื่อม

ที่มา : *American Friction Welding, 2015*

รูปที่ 4.83 การเชื่อมหมุนแบบต่อเนื่อง (Continuous drive RFW)



(ก) การไหลของเนื้อโลหะขณะเชื่อม

ที่มา : MT Aerospace, 2015



(ข) ตัวอย่างชิ้นงานโลหะที่ผ่านการเชื่อม

ที่มา : IMHOF HARTCHROM, 2016

รูปที่ 4.84 การเชื่อมหมุนแบบอาศัยแรงเฉื่อย (Inertia RFW)

4.6 กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิต (Thermit Welding : TW)

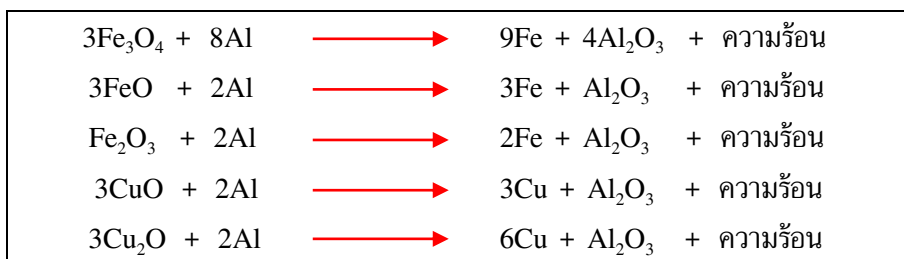
Golaschmidt Germany (2020) ได้กล่าวถึงกรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิต หรือบางครั้งเรียกว่า เทอร์ไมต์ ว่าถูกค้นพบโดย ศาสตราจารย์ ดร. ฮันส์ โกลด์ชมิทท์ (Hans Goldschmidt) เป็นนักเคมีชาวเยอรมัน จากการผลิตโลหะหนักจากออกไซด์ของโลหะโดยทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของอลูมิเนียม ซึ่งก็คือ ปฏิกิริยาอลูมิเนียมเทอร์มิตและเรียกหลักการนี้ว่า “ขบวนการเทอร์มิต (Thermit process)” เป็นลักษณะของปฏิกิริยาประเภทคายความร้อน ดังนั้น จึงได้ประยุกต์เอาความร้อนที่คายออกนำมาใช้ในการหลอมละลายเนื้อโลหะ เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อกันได้ด้วยที่มาของแหล่งความร้อนจากปฏิกิริยาทางเคมี กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิตนี้จึงมีความแตกต่างจากกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายอื่น ๆ

ขบวนการเทอร์มิต (Thermit process) จะเกิดจากปฏิกิริยาอลูมิเนียมเทอร์มิตที่ประกอบด้วย ส่วนผสมของผงเหล็กออกไซด์และผงอลูมิเนียมผสมทำปฏิกิริยากัน ดังแสดงในสมการทางเคมีข้างล่างนี้



โลหะอลูมิเนียมจะถูกทำการออกซิไดซ์โดยโลหะออกไซด์ชนิดอื่น ๆ ได้แก่ ไอร์รอนออกไซด์ (Iron oxide) คอปเปอร์ออกไซด์ (Copper oxide) แมงกานีสออกไซด์ (Manganese oxide) และ โครเมียมออกไซด์ (Chromium oxide) เป็นต้น ได้ผลของปฏิกิริยาออกมาเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) + โลหะ (Metal) + ความร้อน (Heat) โดยนำความร้อนที่ได้มาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งมีระดับปริมาณความร้อนสูงมากที่สามารถหลอมโลหะให้เป็นของเหลวได้จากการวิจัย พบว่า ขบวนการของปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นและสิ้นสุดลงได้อย่างสมบูรณ์เมื่อออกซิเจนแอฟฟินิตี (Oxygen affinity) ของตัวรีดิวซ์ ซึ่งก็คือ อลูมิเนียมต้องมีค่าสูงกว่าออกซิเจนแอฟฟินิตีของโลหะออกไซด์ซึ่งถูกรีดิวซ์ ดังแสดงตัวอย่างของปฏิกิริยาเทอร์มิตที่นิยมใช้กันดังสมการข้างล่างนี้ หลักการทางเคมีของปฏิกิริยาเทอร์มิต

สามารถใช้โลหะชนิดอื่นตัวรีดิวซ์ก็ได้แต่ไม่นิยม จะนิยมใช้อลูมิเนียมด้วยเหตุเพราะอลูมิเนียมมีสมบัติที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยานี้ กล่าวคือ มีจุดหลอมเหลวต่ำที่อุณหภูมิ 660 °C ทำให้หลอมเป็นโลหะเหลวได้ง่ายแต่มีจุดเดือดที่สูงถึง 2,327 °C ซึ่งช่วยส่งเสริมให้อุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังสามารถสร้างชั้นฟิล์มบาง ๆ ที่มีความเสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ดีกว่าโลหะชนิดอื่น



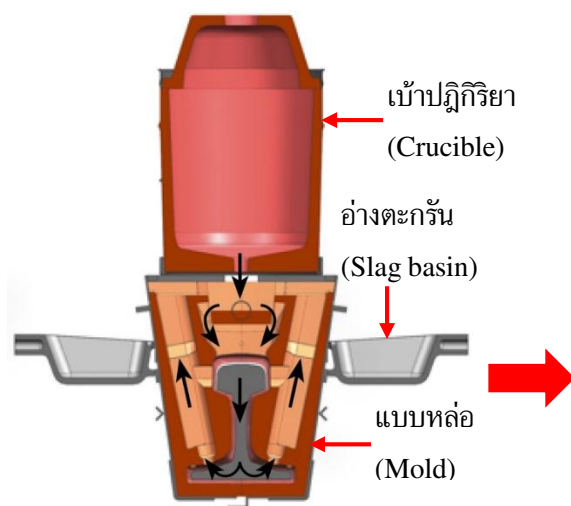
การนำประโยชน์ของปฏิกิริยาเทอร์มิตมาใช้งานส่วนใหญ่เป็นงานที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโลหะ เพราะโลหะเหลวและความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะสามารถเชื่อมประสานให้โลหะติดกันได้ดี โดยที่อลูมิเนียมออกไซด์มีสมบัติเบา (ความหนาแน่นต่ำ) และสามารถลอยตัวแยกออกจากราน้ำโลหะได้ดีที่เรียกว่า สแลก (Slag) นอกจากนี้ ยังมีการปรับปรุงสารผสมเทอร์มิต โดยการเติมธาตุผสมบางตัวที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของการเชื่อม เช่น เพิ่มความสามารถในการไหลตัวของโลหะเหลว (Fluidity) หรือลดอุณหภูมิการแข็งตัวของสแลก เป็นต้น

กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิต (Thermit welding process) ปัจจุบันได้มีการพัฒนานำไปใช้เชื่อมกับลักษณะงานที่หลากหลายประเภทมากขึ้น ดังต่อไปนี้

1. กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ (Thermit rail welding process)

Ramakant Sharma (2020) ได้อธิบายไว้ในคู่มือปฏิบัติงานเชื่อมรางรถไฟ ถึงปฏิกิริยาเทอร์มิตที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในขบวนการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ จะออกแบบให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นในชุดอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.85 ที่ประกอบไปด้วยเบ้าปฏิกิริยา (Crucible) แบบหล่อ (Mold) และอ่างตะกอน (Slag basin) ที่เป็นองค์ประกอบหลัก โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่ ดังนี้

- เบ้าปฏิกิริยา (Crucible) มีหน้าที่ในการสร้างน้ำเหล็กเหลวด้วยปฏิกิริยาเทอร์มิต พร้อมแยกขี้ตะกอนให้ลอยสู่ด้านบนของน้ำเหล็ก โดยสารผสมเทอร์มิตประกอบด้วยเหล็กออกไซด์ (Iron oxide) กับผงอลูมิเนียม (Aluminum power) ดังแสดงในรูปที่ 4.86 (ก) ผสมกันแล้วบรรจุลงในเบ้าปฏิกิริยา
- แบบหล่อ (Mold) เป็นส่วนของโครงแบบขึ้นงานรางรถไฟที่รองรับการไหลของน้ำเหล็กเหลวให้เข้าเต็มแบบ พร้อมมีช่องรูส้น (Riser) เพื่อระบายสแลกที่ติดมาออกสู่ภายนอก ดังในรูปที่ 4.86 (ข)
- อ่างตะกอน (Slag basin) เป็นส่วนของอุปกรณ์ที่ติดตั้งเพื่อรองรับขี้ตะกอนพร้อมกับน้ำเหล็กเหลวบางส่วนที่ล้นออกมาจากทางรูส้น ซึ่งจะมี 2 ข้างเพื่อต้องการให้เกิดความสมมาตรกันของการไหลเข้าโครงแบบของน้ำเหล็กเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.86 (ค)



รูปที่ 4.85 ชุดส่วนประกอบของอุปกรณ์ขบวนการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ

ที่มา : Goldschmidt : Thermit ® Welding Processes, 2012



ผงอลูมิเนียม (Aluminum powder)



ผงเหล็กออกไซด์ (Iron oxide)

(ก) สารผสมเทอร์มิต (Thermit powder)

ที่มา : GOLDSCHMIDT: Smart Rail Solutions, 2020



(ข) แบบหล่อเชื่อมรางรถไฟ (Mold thermit welding)

ที่มา : GOLDSCHMIDT: Smart Rail Solutions, 2020



(ค) อ่างรับตะกรัน (Slag basin)

ที่มา : AGICO Rail Joint, 2011

รูปที่ 4.86 ชุดส่วนประกอบของอุปกรณ์ขบวนการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ

ลำดับขั้นตอนของการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.87 พร้อมคำอธิบายถึงรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. เป็นขั้นตอนเตรียมของขบวนการเชื่อม มี 2 ส่วน คือ

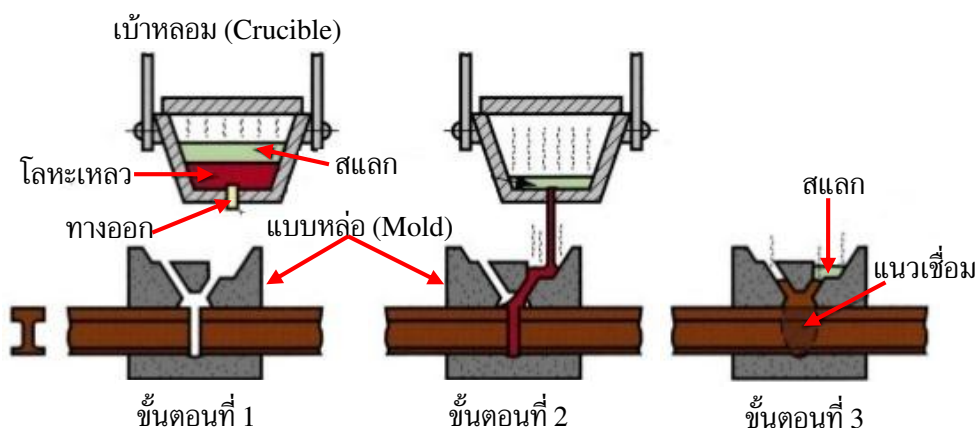
1. ส่วนของแบบหล่อ โดยการนำแบบหล่อที่ทำด้วยทรายควอร์ซหรืออิฐทนไฟไปประกอบเข้ากับปลายของเหล็กรางรถไฟที่ห่างกันของปลายเพื่อเป็นร่องแนวเชื่อมประมาณ 25–30 มม. พร้อมกับอุดรอยก้นน้ำเหล็กหล่อด้วยปูนทนความร้อน

2. ส่วนของการเตรียมสารผสมเทอร์มิตลงในเบ้าหลอม แล้วนำไปวางที่ตำแหน่งบนแบบหล่อ โดยให้รูปลอนน้ำเหล็กไหลตรงกับทางเข้าแบบหล่อ (Runner) ก่อนเชื่อมต่อให้ความร้อนที่ปลายของเหล็กรางก่อนด้วยการเผาด้วยเปลวแก๊ส (Pheating) จนกว่าจะได้อุณหภูมิโดยประมาณ $600\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ประมาณ 5 นาที) จากนั้นเริ่มจุดระเบิดผงเทอร์มิตในเบ้าหลอมให้เกิดเป็นปฏิกิริยาเทอร์มิตขึ้นภายใน กลายเป็นความร้อนที่ทำให้ผงเหล็กเกิดการหลอมเหลวได้เป็นน้ำเหล็กเหลวและขึ้นตะกอนที่แยกกันลอยอยู่ผิวบน น้ำเหล็กเหลวพร้อมที่จะถูกปล่อยไหลไปสู่แบบหล่อเชื่อม (Mold)

ขั้นตอนที่ 2. ขณะที่ปลายเหล็กรางร้อนพร้อมแล้ว ช่องทางออกของน้ำเหล็กที่ก้นเบ้าหลอมจะถูกเปิดออก เพื่อให้น้ำเหล็กไหลด้วยแรงโน้มถ่วงเข้าสู่แบบหล่อจนเต็มโพรงแบบหล่อเชื่อม โดยสังเกตการเติมเต็มแบบได้จากการที่น้ำเหล็กและขึ้นตะกอนส่วนที่ล้นออกมาทางรูล้น (Riser) ที่รองรับด้วยอ่างรับขึ้นตะกอน (Slag basin)

ขั้นตอนที่ 3. หลังจากน้ำเหล็กเต็มโพรงแบบก็เคลื่อนเบ้าหลอมออก รอจนน้ำเหล็กแข็งตัวทำการตกแต่งเนื้อเหล็กส่วนเกินออกด้วยเครื่องมือเฉพาะทางของงานระบบรางรถไฟ มีลำดับขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 4.88

จากคำอธิบายถึงขั้นตอนของการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟในข้างต้นของแต่ละขั้นตอนจะดำเนินไปตามปัจจัยการเชื่อม ซึ่งปัจจัยการเชื่อมรางรถไฟจะเป็นเกณฑ์มาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 4.16



รูปที่ 4.87 ขั้นตอนการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ (Thermit rail welding processes)

ที่มา : Thermite Welding : Principle, Working, Equipment and Application 2017



ขั้นตอนที่ 1 น้ำเหล็กหล่อเชื่อมเย็นตัว

ที่มา : ALAMY : Thermit Welding, 2005



ขั้นตอนที่ 2 กำจัดเนื้อเหล็กหล่อเชื่อมส่วนเกินออก

ที่มา : ELEKTRO THERMIT, 2012



ขั้นตอนที่ 3 เหล็กรางเชื่อมเสร็จ

ที่มา : ALAMY : Thermit Welding, 2005



ขั้นตอนที่ 4 ตกแต่งเหล็กรางเชื่อมด้วยการเจียรระโน

ที่มา : PANDROL Alpha Grinder, 2014

รูปที่ 4.88 ขั้นตอนการกำจัดเนื้อเหล็กหล่อเชื่อมส่วนเกินของการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ

ตารางที่ 4.16 ปัจจัยการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ

ที่มา : Y.Chen et al. Heat transfer modelling of rail thermit welding, Material Science, 2006

| ปัจจัยการเชื่อม (Welding parameters) | ค่ามาตรฐาน (Values) |
|---|---------------------|
| ช่องว่างของรอยต่อ (Weld gap) | 25–30 มม. |
| เวลาให้ความร้อนขึ้นงาน (Preheating time) | 5 นาที |
| อุณหภูมิเผาไหม้รางรถไฟก่อนเชื่อม (Preheating temperature) | 600–800 °C |
| เวลาเปิดช่องน้ำเหล็ก (Tapping time) | 60 วินาที |
| อุณหภูมิเริ่มหลอมโดยเฉลี่ย (Average initial liquid temperature) | 2,050 °C |
| อุณหภูมิสภาพแวดล้อมโดยรอบ (Ambient temperature) | 25 °C |

2. กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิตแท่งวัสดุเสริมแรง (Thermit reinforcing bar welding process)

อรรถกร สัมฤทธิ์เดชขจร (2553) ได้อธิบายถึงกรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิตแบบนี้ว่าจะนิยมใช้กับการเชื่อมเหล็กเส้นเสริมแรง (Reinforcing bar) ในงานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีทั้งที่เป็นแบบผิวเรียบและผิวข้ออ้อย หรืออาจใช้ในการเชื่อมเหล็กเพลาด้านขนาดเล็ก ๆ สำหรับงานอื่น ๆ กรรมวิธีการเชื่อมแบบนี้มีหลักการเชื่อมคล้ายกับการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ จะต่างกันที่ลักษณะงานประเภทนี้จะมีชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งทั้งแนวตั้งและแนวนอน รูปแบบของแบบหล่อและเบ้าหลอมจึงออกแบบตามเบ้าหลอมที่สามารถใช้เชื่อมได้ทั้งที่ต่อกันในแนวนอน (Horizontal joint) และต่อกันในแนวตั้ง (Vertical joint) ดังแสดงในรูปที่ 4.89 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองแบบมีลำดับขั้นตอนการเชื่อมที่เหมือนกัน โดยอ้างอิงขั้นตอนจาก Camille A. Lssa et al. (2006) ดังนี้

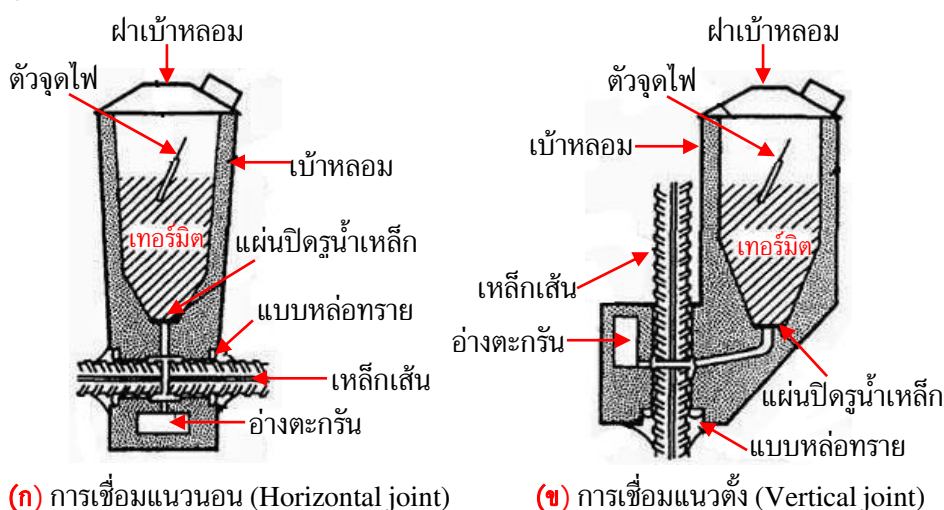
ขั้นตอนที่ 1. นำเบ้าหลอม (Crucible) ไปประกอบเข้ากับแบบหล่อโลหะที่มีปลายของเหล็กเส้นเสริมแรงทั้งสองข้างอยู่ตรงกลาง และตรงรอยต่อของเหล็กเส้นจะต้องตรงกับตำแหน่งของทางป้อนน้ำโลหะ (Runner) พร้อมกับใช้ดินเหนียวทนไฟอุดบริเวณขอบแบบหล่อป้องกันการรั่วไหลของน้ำเหล็ก

ขั้นตอนที่ 2. เตรียมนำสารผสมผงเทอร์มิต (Thermit power) บรรจุลงเบ้าหลอมพร้อมที่จะจุดไฟด้วยตัวจุดไฟ (Igniter)

ขั้นตอนที่ 3. ทำการเผาปลายเหล็กเส้นเสริมแรงให้ร้อนแดงที่อุณหภูมิประมาณ $600-800^{\circ}\text{C}$

ขั้นตอนที่ 4. ทำการจุดไฟสารผสมผงเทอร์มิตพร้อมปิดฝาเบ้าหลอม รอกจนได้น้ำเหล็กเหลวที่อุณหภูมิประมาณ $2,050^{\circ}\text{C}$ จากนั้นเปิดแผ่นรูน้ำเหล็กให้ไหลไปตามทางวิ่งของน้ำเหล็กเข้าสู่รอยต่อโดยมีรูลันที่ระบายชีตะกรันและรองรับน้ำเหล็กที่ล้นออกมา

ขั้นตอนที่ 5. ปลอ่ยให้น้ำเหล็กแข็งตัวแล้วทำการถอดแบบหล่อออก เหล็กเส้นก็จะติดกันดังแสดงในรูปที่ 4.90

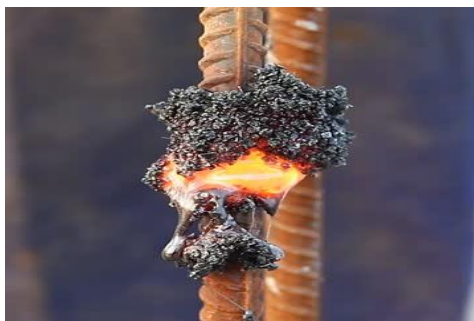


(ก) การเชื่อมแนวนอน (Horizontal joint)

(ข) การเชื่อมแนวตั้ง (Vertical joint)

รูปที่ 4.89 เทคนิคการเชื่อมเทอร์มิตแท่งวัสดุเสริมแรง

ที่มา : Thermit Welding : Principle, Working, Equipment and Application, 2017

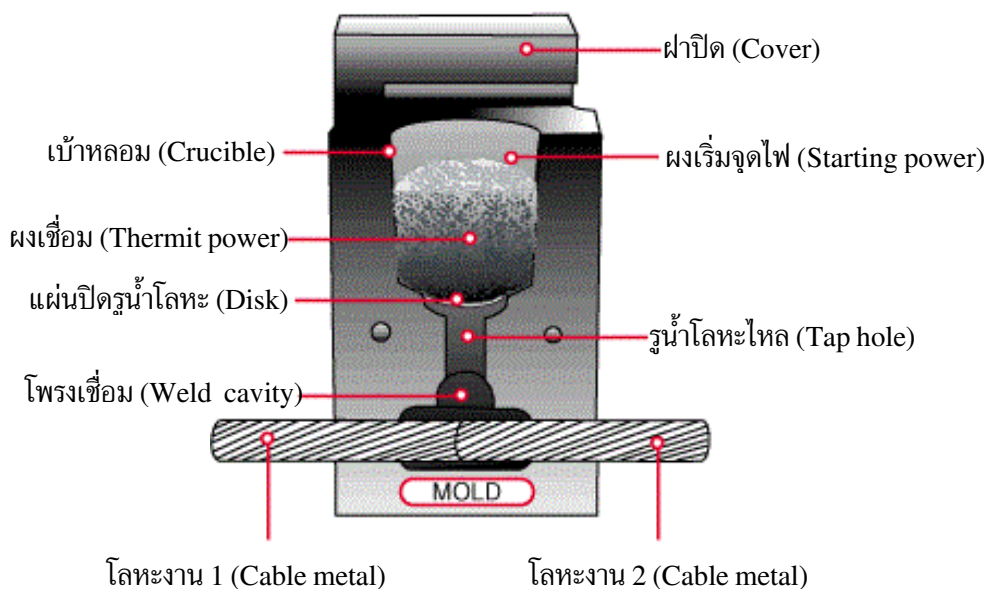


รูปที่ 4.90 ตัวอย่างการเชื่อม
เทอร์มิตแท่งวัสดุเหล็กข้ออ้อยใน
คอนกรีตเสริมแรง

ที่มา : Amiable Weld : Exothermic

3. กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิตงานต่อทางไฟฟ้า (Thermit electrical connections welding process)

กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิตในงานที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อระบบสายไฟฟ้า เป็นที่นิยมกันมาก โดยเฉพาะในงานระบบสายดินหรือสายล่อฟ้า ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมวัสดุโลหะทองแดง จึงต้องใช้ผงสารผสมทองแดงออกไซด์กับอลูมิเนียม เพราะโลหะทองแดงมีความสามารถนำไฟฟ้าได้ดี ดังสมการปฏิกิริยาเทอร์มิตข้างล่างนี้ และมืองค์ประกอบหลักที่สำคัญของขบวนการเชื่อมดังแสดงใน**รูปที่ 4.91**

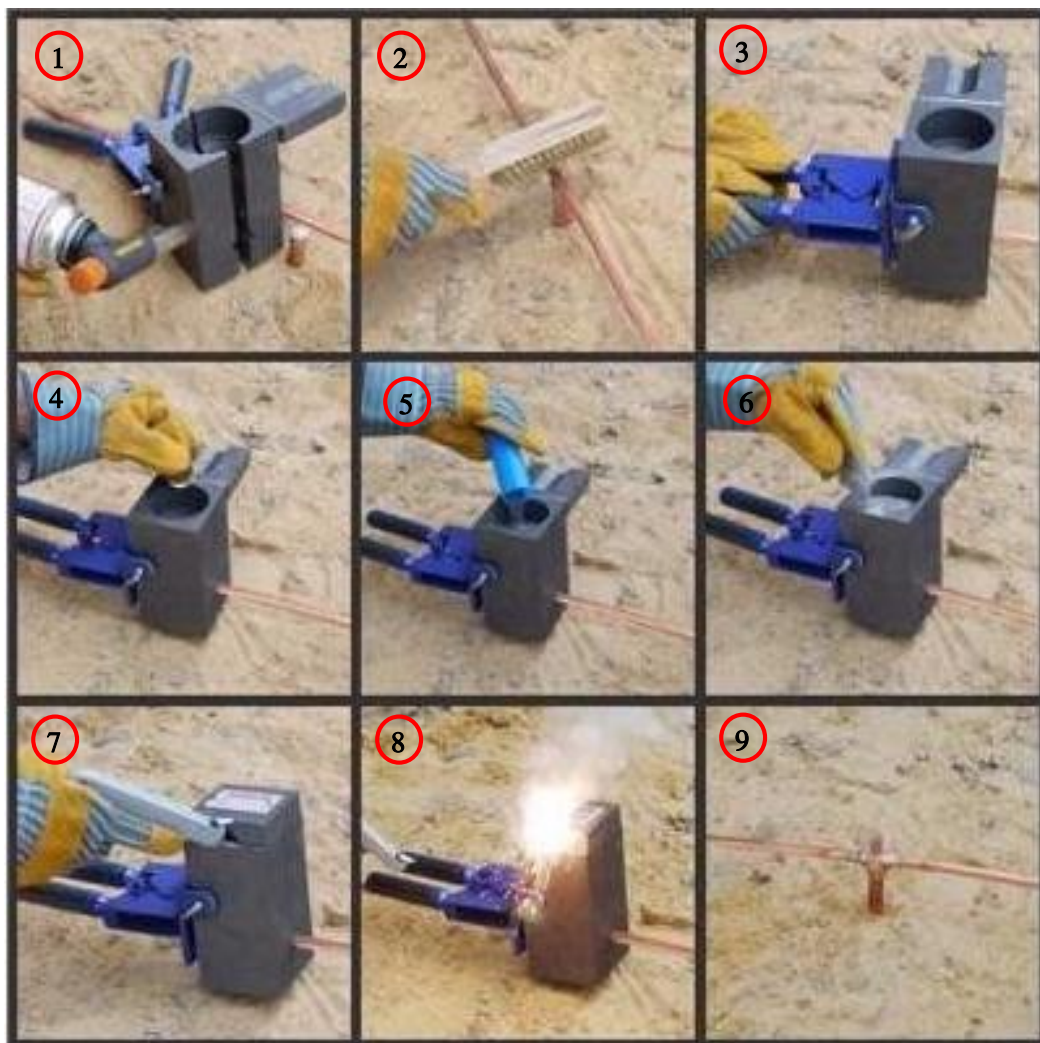


รูปที่ 4.91 องค์ประกอบของการเชื่อมเทอร์มิตงานต่อทางไฟฟ้า

ที่มา : TechtoWeld : Exothermic Welding Connections, 2012

Amiable Impex (2012) ได้ลำดับขั้นตอนของการเชื่อมเทอร์มิตงานเชื่อมต่อทางไฟฟ้าว่า มีลำดับขั้นตอนดังนี้ (**ดูรูปที่ 4.92 ประกอบการอธิบาย**) เริ่มต้นด้วยการเตรียมเบ้าหลอม ผงเทอร์มิต และอุปกรณ์อื่น ๆ จากนั้นก็ทำความสะอาดชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม ต่อด้วยการประกอบเบ้าหลอมที่มีแบบหล่อเข้ากับโลหะชิ้นงานโดยใส่แผ่นจานปิดรูทางน้ำโลหะไหลเข้าสู่แบบหล่อ ตามด้วยการใส่สารผสม

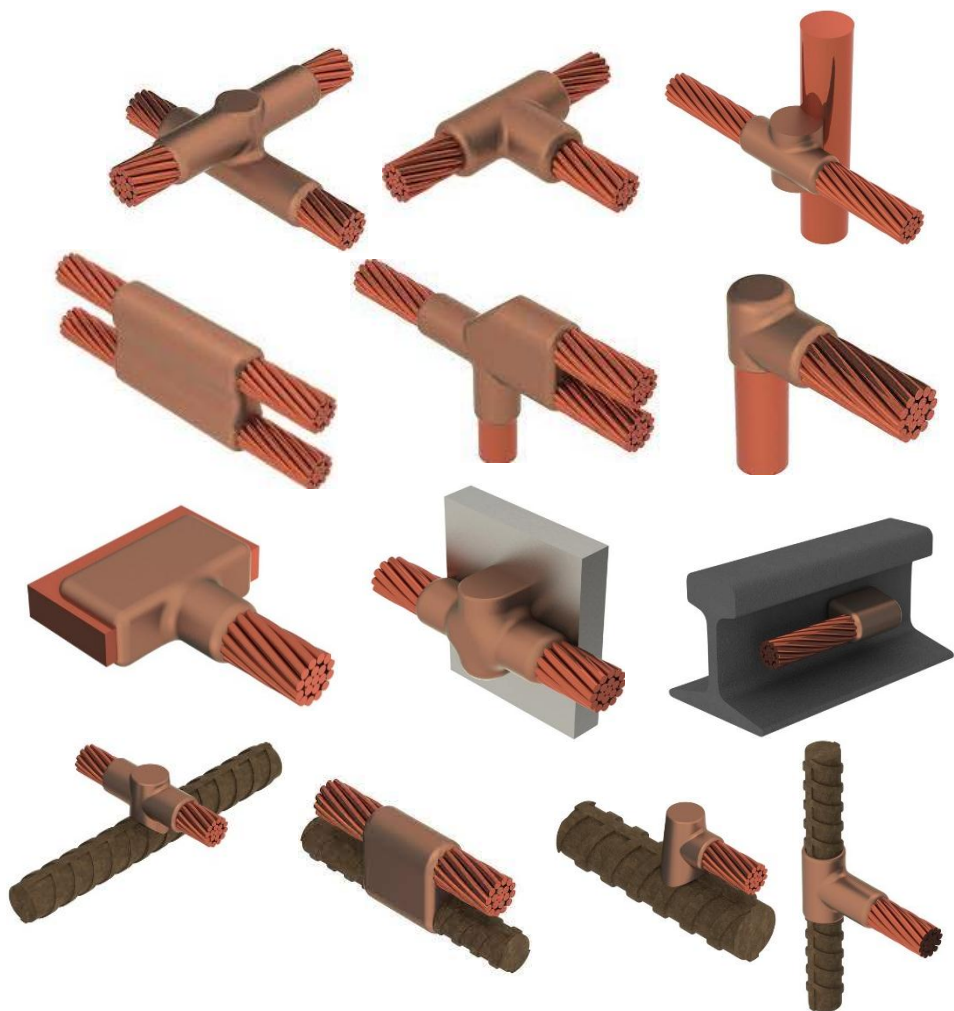
เทอร์มิตลงในเบ้าหลอม ซึ่งต้องใส่ผงจุดไฟไว้ด้านบน ปิดฝาเบ้าหลอมพร้อมจุดไฟ จะเกิดประกายไฟของปฏิกิริยาเทอร์มิตภายในแบบหล่อและได้รับความร้อนมากพอที่จะทำให้โลหะหลอมเหลว จากนั้น แผ่นงานปิดรูหลอมละลายเปิดช่องทางให้น้ำโลหะเหลวที่จะไหลไปเชื่อมโลหะงาน จากนั้น รอจนน้ำโลหะแข็งตัว ทำการถอดแบบหล่อออกจะได้แนวเชื่อมต่อที่สมบูรณ์



รูปที่ 4.92 ลำดับขั้นตอนของการเชื่อมเทอร์มิตงานต่อทางไฟฟ้า

ที่มา : Amiable Impex. Exothermic Welding Catalouge, 2012

การออกแบบเบ้าหลอมและแบบหล่อจะพิจารณาจากลักษณะรูปแบบของงานที่เชื่อม ซึ่งมีทั้งที่เป็นแบบเชื่อมต่อปลายลวดชนิดเดียวกัน เชื่อมต่อกับโลหะลวดต่างชนิด หรือเชื่อมต่อกับวัสดุโครงสร้างหลักอื่น ดังแสดงตัวอย่างรูปแบบของลักษณะรอยต่อรูปแบบต่าง ๆ ในรูปที่ 4.93 และตัวอย่างแบบหล่อ (Graphite mold) ที่ออกแบบตามลักษณะของรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 4.94



รูปที่ 4.93 ตัวอย่างรอยต่อรูปแบบต่าง ๆ ของการเชื่อมเทอร์มิตงานเชื่อมต่อทางไฟฟ้า

ที่มา : Amiable Impex : Thermite Welding Powder, 2014



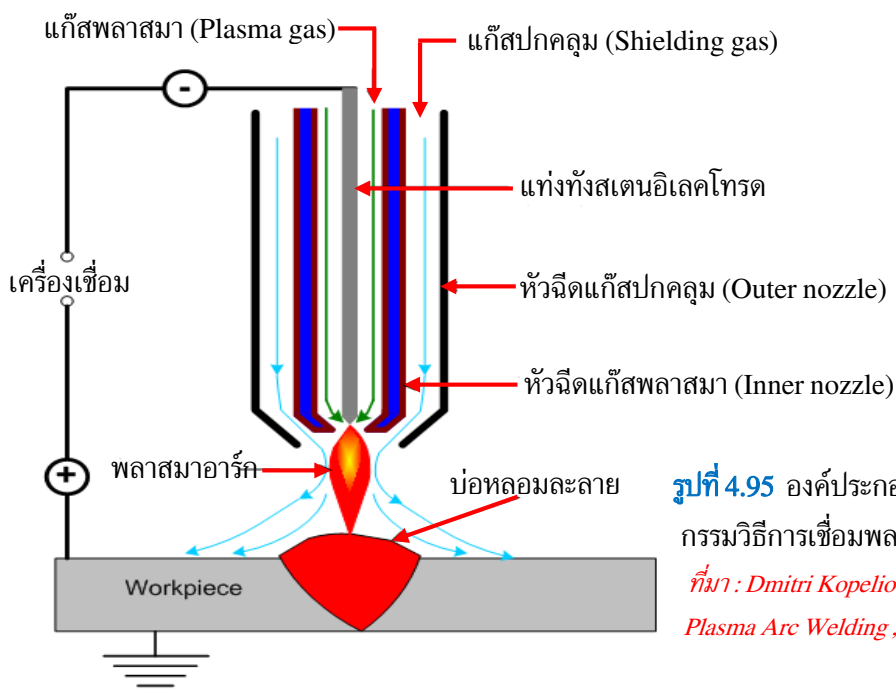
รูปที่ 4.94 ตัวอย่างแบบหล่อกราฟไฟต์ของการเชื่อมเทอร์มิตงานเชื่อมต่อทางไฟฟ้า

ที่มา : Thermite Weld (Pakistan) EST., 2014

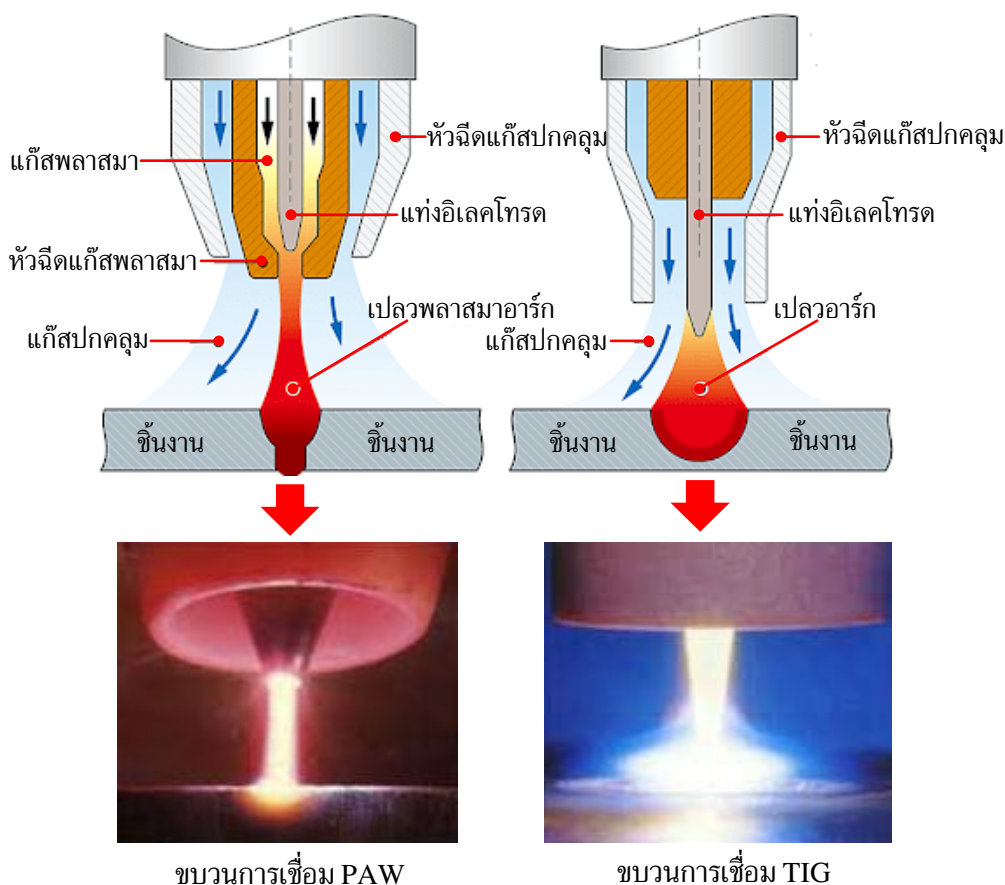
4.7 กรรมวิธีการเชื่อมด้วยอาร์กพลาสมา (Plasma Arc Welding : PAW)

THERMAL ARC (2009) ได้กล่าวถึงกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กด้วยพลาสมาไว้ว่า เป็นขบวนการเชื่อมที่อาศัยความร้อนสำหรับการหลอมละลายเนื้อโลหะที่เกิดจากการอาร์กของแท่งทังสเตนที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรด ที่เรียกว่า “Non-consumable electrode” กับชิ้นงานโลหะ ดังได้แสดงถึงองค์ประกอบของกรรมวิธีการเชื่อมในรูปที่ 4.95 โดยกระแสไฟอาร์กได้จากแหล่งจ่ายของเครื่องเชื่อม ซึ่งขณะแท่งอิเล็กโทรดเริ่มอาร์กกับชิ้นงานก็จะมีเปลวแก๊สพลาสมาไหลผ่านหัวฉีดแก๊สพลาสมา (Plasma nozzle) ซึ่งอยู่ชั้นในจึงมักเรียกว่า “Inner nozzle” ที่มีระบบน้ำหล่อเย็นช่วยระบายความร้อน เป็นตัวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการอาร์กให้ได้รับความร้อนที่สูงขึ้นโดยโลหะเกิดการหลอมเหลวได้เร็วขึ้น ในขณะเดียวกันก็ต้องใช้แก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลาย (Shielding gas) โดยไหลออกมาพร้อมกันโดยผ่านทางช่องของหัวฉีดแก๊สปกคลุม (Shielding gas nozzle) ที่อยู่ด้านนอกจึงเรียกว่า “Outer nozzle”

ขบวนการเชื่อมด้วยอาร์กพลาสมาเป็นเทคโนโลยีการเชื่อมที่พัฒนามาต่อยอดจากขบวนการเชื่อมแก๊สทังสเตนอิเล็กโทรด (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW) หรือที่เรียกกันว่า การเชื่อม “TIG” ที่มาจาก Tangsten Inert Gas ดังนั้น กรรมวิธีการเชื่อมจึงมีความคล้ายกันมาก แตกต่างกันที่หัวเชื่อมออกแบบให้มีหัวฉีดแก๊ส 2 ชั้น มีแก๊สพลาสมาช่วยการอาร์ก โดยที่ส่วนองค์ประกอบอื่น ๆ เหมือนกันดังแสดงการเปรียบเทียบกันขององค์ประกอบของขบวนการเชื่อมของทั้งสอง ในรูปที่ 4.96



รูปที่ 4.95 องค์ประกอบของกรรมวิธีการเชื่อมพลาสมา
ที่มา : Dmitri Kopeliovich : Plasma Arc Welding , 2012



รูปที่ 4.96 เปรียบเทียบองค์ประกอบของขบวนการเชื่อม PAW กับขบวนการเชื่อม TIG

ที่มา : CHIH SHENG YI : Plasma Welding Machines , 2012

อุปกรณ์และเครื่องของขบวนการเชื่อมพลาสมา (Plasma arc welding equipment)

การเชื่อมพลาสมาประกอบด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ อ้างอิงจาก SanRex (2014)

1. เครื่องเชื่อม (Power source) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า โดยสามารถใช้ได้ทั้งระบบไฟฟ้าที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current : DC) และไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current : AC) จากการศึกษาจากงานวิจัย พบว่า การเชื่อมพลาสมานำให้เลือกใช้ไฟฟ้ากระแสตรงจะเหมาะสมกว่าและต้องเป็นแบบกระแสคงที่ (Content current) ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ทั้งประเภทเครื่องเชื่อมที่เป็น Generator และ Rectifier โดยเลือกสภาพขั้วในการเชื่อมเป็นแบบกระแสไฟตรงขั้วตรง (Direct Current Straight Polarity : DCSP หรือ Direct Current Electrode Negative : DCEN) ซึ่งก็หมายถึง การต่อขั้วลบ (-) เข้ากับหัวเชื่อมและต่อขั้วบวก (+) เข้ากับชิ้นงาน ความร้อนจะเกิดขึ้นที่ขั้วของชิ้นงานมากกว่าที่หัวเชื่อม ชิ้นงานจึงมีอัตราการซึมลึกสูงมาก ซึ่งหลักการนี้เป็นจุดเด่นของกรรมวิธีการเชื่อมพลาสมา ซึ่งโดยปกติเครื่องเชื่อมที่เลือกใช้จะมีความสามารถในการปรับระดับกระแสไฟได้ตั้งแต่ 2 – 200 แอมแปร์ ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องเชื่อม (Duty cycle) อยู่ที่ระดับ 60% ยกเว้นกรณีที่มีการเชื่อมงานที่มีขนาดใหญ่อาจเลือกเครื่องเชื่อมที่มีขนาดกำลังกระแสสูงถึง 300

แอมแปร์ และระดับแรงดันจะอยู่ที่ประมาณ 80 โวลต์ ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องเชื่อมพลาสมาที่พบเห็นและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ในรูปที่ 4.97 (ก) นอกจากนี้ ยังมีการออกแบบและผลิตเครื่องเชื่อมเพื่อใช้กับงานเชื่อมด้วยแขนกลอัตโนมัติสำหรับระบบงานผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงในรูปที่ 4.97 (ข) และที่สำคัญ คือ เครื่องเชื่อมพลาสมาเหมาะสำหรับการเชื่อมงานที่มีขนาดเล็ก ๆ ที่กรรมวิธีการเชื่อมแบบอื่น ๆ ไม่สามารถทำการเชื่อมได้ซึ่งเป็นจุดเด่นของการเชื่อมพลาสมา เช่น ชิ้นงานโลหะบางขนาด 100 ไมครอน – 1.5 มม. หรือชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก ๆ มีพื้นที่ให้เชื่อมน้อย ๆ จะเรียกเครื่องเชื่อมชนิดนี้ว่า เครื่องเชื่อมไมโครพลาสมา (Micro plasma welding machine) ที่มีช่วงปรับกระแสไฟเชื่อมอยู่ระหว่าง 0.5–50 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.97 (ค)



(ก) เครื่องเชื่อมพลาสมา

(Plasma welding machine)

ที่มา : SanRex : Welding equipment, 2009



(ข) เครื่องเชื่อมไมโครพลาสมา

(Micro plasma welding machine)

ที่มา : Aircraft : Plasma equipment, 2012

รูปที่ 4.97 เครื่องเชื่อมแบบต่าง ๆ ของการเชื่อมพลาสมา



(ค) เครื่องเชื่อมพลาสมาแขนกล

(Automatic plasma welding machine)

ที่มา : SanRex : Welding equipment, 2009

2. หัวเชื่อมพลาสมาและอุปกรณ์เสริม (Plasma welding torch and accessory) หัวเชื่อมเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ต้องออกแบบให้เหมาะสมกับหน้าที่ของการใช้งาน หัวเชื่อมพลาสมาดูจากลักษณะ

โดยรวมเหมือนกันกับหัวเชื่อมทิก จะแตกต่างกันที่หัวเชื่อมพลาสมามีส่วนประกอบเพิ่มเติมบางส่วน เช่น มีหัวฉีดยาแก๊สพลาสมา ท่อนำแก๊สพลาสมา และระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ เป็นต้น โดยในรูปที่ 4.98 (ก) เป็นการแสดงถึงองค์ประกอบภายในของหัวเชื่อมพลาสมา และลักษณะทางกายภาพของหัวเชื่อมวัสดุที่นำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนจะต้องทนความร้อนได้สูง เพราะพลังงานความร้อนที่เกิดจากอาร์กด้วยเปลวของแก๊สพลาสมาที่มีความร้อนสูงมาก แม้จะมีระบบระบายความร้อนด้วยระบบน้ำไหลวนภายในหัวเชื่อมก็ตาม

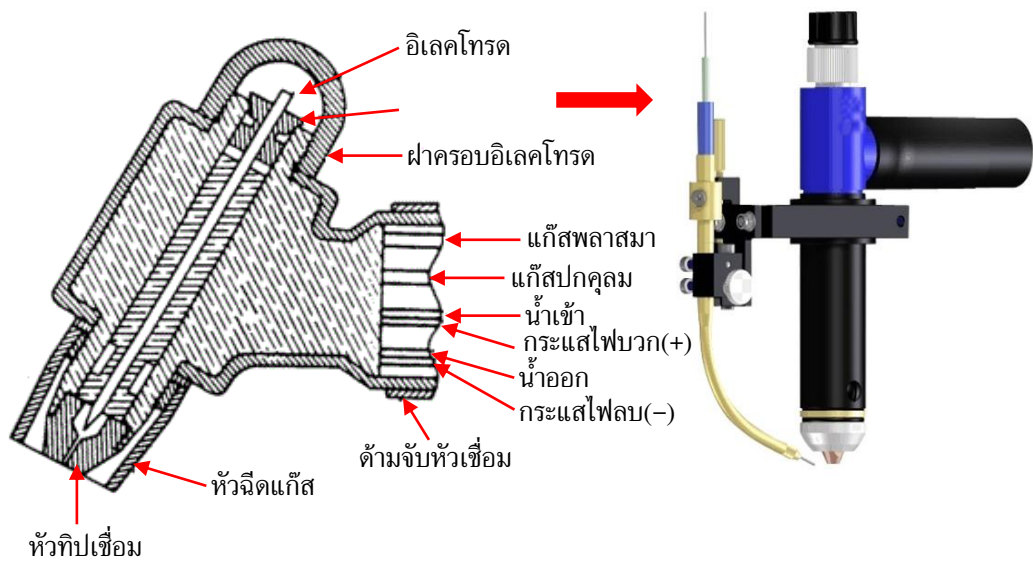
ประเภทของหัวเชื่อมพลาสมาที่ใช้กันในปัจจุบันสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

- หัวเชื่อมประเภทเชื่อมแบบไมโครพลาสมา (Micro plasma welding torch) เป็นหัวเชื่อมประเภทที่ใช้กับการเชื่อมงานที่มีขนาดเล็ก พื้นที่รอยเชื่อมน้อย ใช้กระแสเชื่อมต่ำ (ไม่เกิน 50 แอมแปร์) ซึ่งเรียกการเชื่อมพลาสมาจำพวกนี้ว่า “การเชื่อมไมโครพลาสมา (Microplasma welding process)” ด้วยเพราะลักษณะงานที่ขนาดเล็กพื้นที่แคบ หรือหัวเชื่อมเข้าถึงยาก จึงได้มีการออกแบบหัวเชื่อมที่มีขนาดในระดับไมโครพลาสมาใช้ หัวเชื่อมมีขนาดค่อนข้างเล็กและให้สามารถปรับมุมมองสาเชื่อมได้หลากหลายระดับองศา หรือบางครั้งออกแบบไว้สำหรับงานเฉพาะบางอย่าง ดังแสดงตัวอย่างของหัวเชื่อมไมโครพลาสมาแบบต่าง ๆ ในรูปที่ 4.98 (ข)

- หัวเชื่อมประเภทเชื่อมแบบกระแสไฟสูง (High amperage plasma welding torch) หรือบางครั้งเรียกว่า “การเชื่อมคีย์โฮลพลาสมา (Keyhole plasma)” หัวเชื่อมประเภทนี้มีขนาดที่โตขึ้น ชิ้นส่วนทนความร้อนได้มากขึ้น เพราะใช้เชื่อมกับกระแสไฟเชื่อมที่สูงขึ้น (เกิน 50 แอมแปร์ แต่ไม่เกิน 300 แอมแปร์) มีทั้งที่มี Duty cycle 60 % และ 100 % โดยสามารถปรับมุมเชื่อมได้หลายองศาเพื่อความเหมาะสมกับตำแหน่งงานที่เชื่อม ดังแสดงตัวอย่างของหัวเชื่อมแบบกระแสไฟเชื่อมสูงในรูปที่ 4.98 (ค)

ขบวนการอาร์กของพลาสมา (Plasma arc process) จะได้เปลวพลาสมาที่มีความสามารถในการสร้างความร้อนสูงในเวลาอันสั้นซึ่งเหมาะนำมาหลอมละลายเนื้อโลหะ ปัจจุบันได้มีการประยุกต์ขบวนการอาร์กของพลาสมาเข้ามาใช้งานกันมากขึ้น โดยเทคโนโลยีของการอาร์กตลอดทั้งสแตนให้เกิดเปลวพลาสมาสำหรับงานเชื่อมพลาสมา มี 2 แบบ คือ

- การเชื่อมแบบถ่ายโอนพลาสมาอาร์กไปยังชิ้นงาน (Transferred plasma arc welding) ดังแสดง ในรูปที่ 4.99 (ก) โดยอ้างอิงจากการวิจัยของ Ruiying Zhang et al. (2016) โดยกระแสไฟเชื่อมขั้วลบ (-) ถูกต่อเข้ากับขั้วแท่งทั้งสแตนเลสโครม และขั้วบวก (+) ต่อผ่านไปยังชิ้นงาน แก๊สพลาสมาไหลผ่านหัวฉีดยาของแก๊สเป็นแบบพลาสมาสเปรย์ไปยังโลหะชิ้นงานที่เป็นขั้วบวกด้วยความหนาแน่นของพลังงานที่มากและมีความเร็วสูง ทำให้ชิ้นงานเกิดความร้อนและหลอมละลายอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะนำการถ่ายโอนแบบนี้ไปใช้กับการเชื่อมที่ต้องการความร้อนสูง เช่น ชิ้นงานหนาต้องการแนวเชื่อมซึมลึกมาก และยังนิยมนำไปใช้กับขบวนการตัด (Plasma cutted)



(ก) ส่วนประกอบภายในของหัวเชื่อมพลาสมา และลักษณะของหัวเชื่อมพลาสมา

ที่มา : Weld Guru : Plasma Welding. 2019



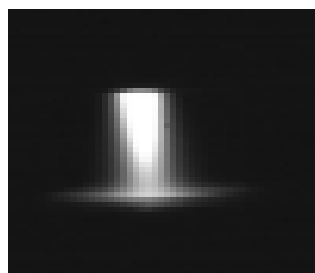
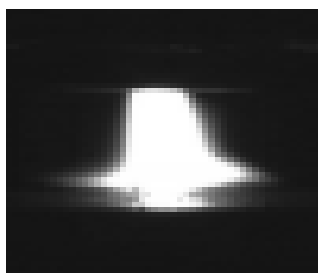
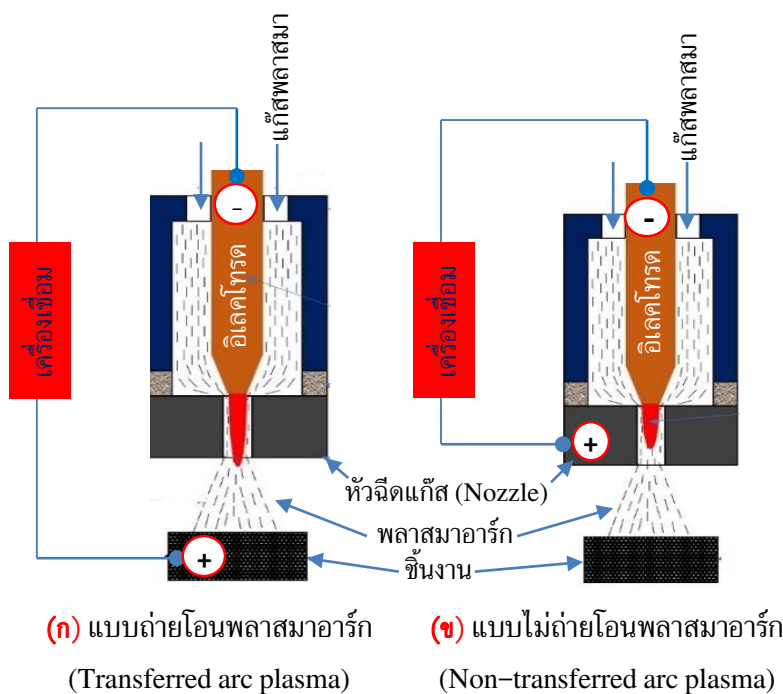
(ข) หัวเชื่อมพลาสมาแบบ 1-6 ใช้สำหรับการเชื่อม Microplasma

ที่มา : Process Welding Systems, Inc. 2009

(ค) หัวเชื่อมพลาสมาแบบ 7-11 ใช้สำหรับการเชื่อม High Amperage Plasma

ที่มา : Process Welding Systems, Inc. 2009

รูปที่ 4.98 ส่วนประกอบและชนิดของหัวเชื่อมพลาสมา



(ค) เปรียบเทียบเปลวอาร์คและรอยเชื่อมแบบถ่ายโอนกับไม่ถ่ายโอนของพลาสมาอาร์ค

ที่มา : R. Zhang et al., Journal of Manufacturing Processes 24, 152–160, 2016

รูปที่ 4.99 ความแตกต่างของพลาสมาอาร์คในหัวเชื่อมแบบพลาสมา

ที่มา : Modern Arc Welding Technology : Ador Welding Limited, 2016

- การเชื่อมแบบไม่ถ่ายโอนพลาสมาอาร์กไปยังชิ้นงาน (Non-Transferred plasma arc welding) ดังแสดง ในรูปที่ 4. 99 (ข) โดยกระแสไฟเชื่อมขั้วลบ (-) จากเครื่องเชื่อมจะถูกต้องเข้ากับขั้วแท่งทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรด และขั้วบวก (+) จะต่อเข้ากับหัวฉีดแก๊ส (Nozzle) แก๊สพลาสมาจะเกิดการอาร์กที่หัวฉีดแก๊ส โดยสเปรย์พลาสมาวิ่งผ่านหัวฉีดที่แคบและเล็กด้วยความเร็วที่สูงมากเป็นรูปแบบของสเปรย์ที่เรียกว่า “สเปรย์อาร์ก (Plasma spray arc)” ผ่านไปยังชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานจะหลอมละลายเป็นจุดรวมของปลายสเปรย์ นิยมใช้เชื่อมโลหะที่บาง ๆ ซึ่งไม่ต้องการความร้อนมาก วิธีการพลาสมาสเปรย์นี้ยังเป็นที่นิยมสำหรับการพ่นเคลือบหรือพ่นพอก (Thermal spray) บนพื้นผิวโลหะ

3. ชุดคอนโซลควบคุม (Control console) เป็นชุดอุปกรณ์สั่งการควบคุมปัจจัยการเชื่อมพลาสมา ได้แก่ ควบคุมการไหลของแก๊สพลาสมา (Plasma gas flow) ควบคุมการไหลของแก๊สปกคลุม (Shielding gas flow) และควบคุมปัจจัยทางพลังงานไฟฟ้า (Current and Arc volte) โดยชุดคอนโซลนี้เป็นระบบหน่วยที่แยกส่วนกับระบบของตัวเครื่องเชื่อม ซึ่งอาจออกแบบประกอบรวมไว้กับตัวของเครื่องเชื่อม (Built in unit) หรือบางครั้งอาจแยกส่วนออกมาจากตัวเครื่องเชื่อม (External unit)

4. ระบบน้ำระบายความร้อน (Water recirculator) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ระบายความร้อนของหัวเชื่อม ซึ่งการเชื่อมพลาสมาเกิดความร้อนขณะเชื่อมสูงมาก จึงจำเป็นต้องตรวจสอบระบบการไหลวนของน้ำเข้าและน้ำออกให้มีความพร้อมเสมอก่อนทำการเชื่อม

แก๊สและแท่งอิเล็กโทรดของขบวนการเชื่อมพลาสมา (Gases and electrode of PAW)

การเชื่อมพลาสมามีวัสดุที่สิ้นเปลืองเป็นแก๊สพลาสมา (Plasma gas) และแก๊สปกคลุม (Shielding gas) กับแท่งทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรด (Non-Consumable tungsten electrode) ดังรายละเอียดเพิ่มเติมของแต่ละอย่างดังต่อไปนี้

- แก๊สพลาสมา (Plasma gas/Orifice gas) การเลือกใช้แก๊สจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งเชื่อม การออกแบบรอยเชื่อม และชนิดของโลหะชิ้นงานเชื่อม ในทางปฏิบัติส่วนใหญ่มักเลือกใช้แก๊สพลาสมา กับแก๊สปกคลุมเป็นชนิดเดียวกัน เว้นแต่ว่าบางลักษณะงานที่มีข้อดีข้อเสียของขบวนการเชื่อม ก็จะสามารถเลือกใช้แก๊สที่ต่างชนิดกันได้ แก๊สพลาสมาที่เลือกใช้จะเป็นกลุ่มประเภทแก๊สเฉื่อย (Inert gas) ที่นิยมเลือกใช้กันมากคือ แก๊สอาร์กอน (Argon) และแก๊สอาร์กอนผสมแก๊สไฮโดรเจน (Argon-Hydrogen mixture) ซึ่งต้องมีความบริสุทธิ์ของแก๊ส 99.99% เพราะช่วยลดอัตราการสิ้นเปลืองของแท่งอิเล็กโทรด โดยปกติช่างเชื่อมจะปรับตั้งอัตราการไหลของแก๊สพลาสมาที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 0.1 – 5 ลิตร/นาที

- แก๊สปกคลุม (Shielding gas) เป็นแก๊สทำหน้าที่ปกป้องบ่อหลอมละลายจากแก๊สบรรยากาศภายนอก เช่นเดียวกับการแก๊สปกคลุมของการเชื่อมทิก ซึ่งเป็นจำพวกแก๊สเฉื่อย (Inert gas) เช่น แก๊สอาร์กอน (Ar) แก๊สฮีเลียม (He) แก๊สผสมอาร์กอน+แก๊สฮีเลียม หรือบางครั้งใช้แก๊สแอคทีฟ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สำหรับการเชื่อมงานวัสดุบางชนิด การปรับอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมจะ

อยู่ระหว่าง 5 – 15 ลิตร/นาที่ ของการเชื่อมกระแสต่ำ ส่วนกรณีที่เชื่อมกระแสสูงอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมจะอยู่ระหว่าง 15 – 32 ลิตร/นาที่

นอกจากแก๊สแล้วแท่งอิเล็กโทรดที่เป็นโลหะทั้งสแตนก็เป็วัสดุที่สิ้นเปลืองเช่นกัน ถึงแม้ว่าจะเป็น Non-consumable electrode ก็ตาม ชนิดของทั้งสแตนอิเล็กโทรดสำหรับการเชื่อมพลาสมาให้เลือกใช้เหมือนกันกับทั้งสแตนอิเล็กโทรดของขบวนการเชื่อมทิก ดังแสดงชนิดของแท่งทั้งสแตนอิเล็กโทรดแต่ละชนิดใน **รูปที่ 4.100** โดยช่างเชื่อมสามารถพิจารณาเลือกจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของทั้งสแตนอิเล็กโทรดที่เหมาะสมกับการเชื่อมแต่ละโลหะงานที่ต้องการเชื่อม ซึ่งผู้ผลิตแท่งอิเล็กโทรดจะมีคำแนะนำในการเลือกใช้กับงานเชื่อมที่เหมาะสม โดยต้องพิจารณาร่วมกับปัจจัยการเชื่อมที่สำคัญด้านอื่น ๆ อีกหลายปัจจัย ดังแสดงเป็นตัวอย่างถึงการกำหนดปัจจัยต่าง ๆ ของการเชื่อมพลาสมา ใน **ตารางที่ 4.17**



รูปที่ 4.100 แท่งทั้งสแตนอิเล็กโทรดสำหรับการเชื่อมพลาสมา

ที่มา : CK WORLDEIDE : Tungsten Electrodes , 2016

ขบวนการเชื่อมพลาสมาช่างเชื่อมสามารถเชื่อมได้ทั้งแบบเติมลวดเชื่อม (Filler welding) และแบบไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenous welding) ซึ่งจะเหมือนกับขบวนการเชื่อมทิก แต่ส่วนใหญ่นิยมใช้เชื่อมชิ้นงานที่ไม่เติมลวดโดยเฉพาะชิ้นงานขนาดเล็ก กรณีเชื่อมแบบเติมลวดก็สามารถเลือกใช้ลวดเชื่อมเปลือย (Filler metals) ที่ใช้กับการเชื่อมทิก ซึ่งมีให้เลือกหลากหลายชนิดวัสดุและหลากหลายขนาดความโตของลวดเชื่อม การเติมลวดเชื่อมด้วยช่างเชื่อมจะต้องสวมชุดป้องกันรังสีความร้อนจากเปลวพลาสมาอย่างมิดชิด เพราะรังสีจากเปลวอาร์กของแก๊สพลาสมา มีความเข้มของรังสีมากกว่าการเชื่อมทิกหลายเท่า ช่างเชื่อมจึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ

ตารางที่ 4.17 ตัวอย่างการกำหนดปัจจัยการเชื่อมพลาสมา

ที่มา : K.S. Prasad et al., Journal of Materials Science, ID. 136318706, 2011

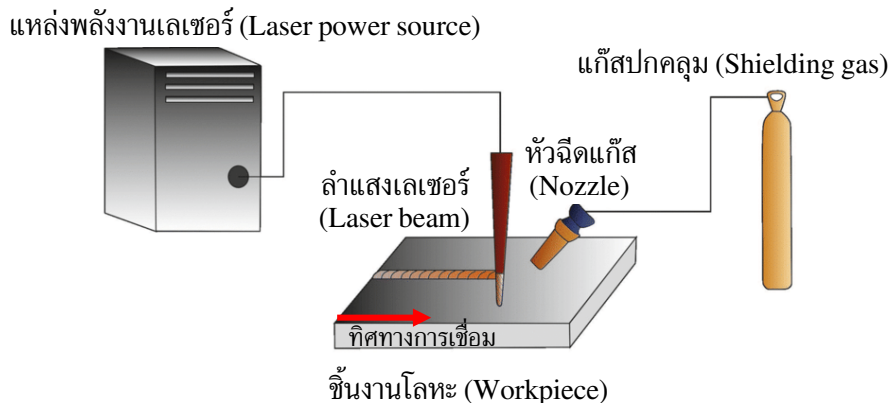
| ปัจจัยการเชื่อม (Welding parameters) | วัสดุโลหะชิ้นงาน (Base matels) |
|---|----------------------------------|
| | AISI 304 SS (แผ่น 2 มม.) |
| • สภาพขั้วเครื่องเชื่อม (Polarity) | DCEN |
| • ระบบกระแสไฟเชื่อม (Mode Current) | ระบบพัลส์ (Pulse mode) |
| • แท่งทังสเตนอิเล็กโทรด (Tungsten electrode) | 2% thoriated tungsten electrode |
| • ขนาดอิเล็กโทรด (Electrode Diameter) | 1 มม. |
| • พลาสมาแก๊ส (Plasma gas) | อาร์กอน + ไฮโดรเจน |
| • อัตราการไหลแก๊สพลาสมา (Plasma gas flow rate) | 6 ลิตร/นาที |
| • แก๊สปกคลุม (Shielding gas) | อาร์กอน |
| • อัตราการไหลแก๊สปกคลุม (Shielding gas flow rate) | 0.4 ลิตร/นาที |
| • แก๊สทำความสะอาด (Purging gas) | อาร์กอน |
| • อัตราการไหลแก๊สทำความสะอาด (Purging gas flow rate) | 0.4 ลิตร/นาที |
| • ขนาด Ø ของหัวฉีด (Nozzle diameter) | 1 มม. |
| • ระยะห่างหัวฉีดกับชิ้นงาน (Nozzle ot plate distance) | 1 มม. |
| • ความเร็วเชื่อม (Welding speed) | 260 มม./นาที |
| • ตำแหน่งหัวเชื่อม (Torch position) | แนวตั้ง |
| • ควบคุมการเชื่อม (Welding control) | แบบอัตโนมัติ (Automatic control) |
| หมายเหตุ DCEP = Direct Current Electrode Negative | |

4.8 กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser Beam Welding : LBW)

กรรมวิธีการเชื่อมนี้เป็นการเชื่อมโลหะด้วยการอาร์กด้วยลำแสงเลเซอร์ โดยคำว่า “Laser” ย่อมาจาก “Light Amplification by Stimulated of Radiation” เป็นเทคโนโลยีการเชื่อมที่อาศัยความร้อนเพื่อการหลอมละลายให้โลหะติดกันจากการตกกระทบของจุดรวมลำแสงเลเซอร์ โดยพลังงานที่กระทบบนชิ้นงานมีความหนาแน่นสูงมาก สามารถจะสร้างความร้อนขึ้นได้อย่างรวดเร็วและเกิดขึ้นบนพื้นที่เล็กและแคบ จึงเป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมงานที่ต้องการความแม่นยำสูง ผลกระทบที่เกิดจากการเชื่อมน้อยมาก แนวเชื่อมมีขนาดเล็กและแคบแต่มีความลึก เป็นขบวนการเชื่อมที่สามารถเชื่อมได้ทั้งแบบเติมลวดเชื่อม (มีทั้งเป็นผงโลหะและลวดโลหะ) และแบบไม่เติมลวดเชื่อมเรียกว่า Autogenous welding โดยอ้างอิงตามข้อมูลของ Interesting Engineering –Innovation (2019)

หลักการทำงานของระบบการเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.101 โดยมีองค์ประกอบหลักสำคัญ คือ แหล่งสร้างพลังงานเลเซอร์ (Laser power source) จากนั้นพลังงานก็จะถูกส่งผ่านไปยังหัวเชื่อม ซึ่งภายในหัวเชื่อมทำหน้าที่รวมพลังงานแสงเลเซอร์ให้รวมเป็นจุดเดียวกันเป็น

ลักษณะของลำแสงเลเซอร์ (Laser beam) ด้วยเลนส์รวมแสง แล้วส่งลำแสงผ่านไปยังชิ้นงานเพื่อสร้างบ่อหลอมละลายด้วยความร้อน ซึ่งในขณะเดียวกันก็มีการป้อนแก๊สเฉื่อย (Inert gas) ให้ไหลผ่านหัวฉีดแก๊ส (Nozzle) ออกไปเพื่อใช้ปกคลุมน้ำโลหะที่หลอมละลาย



รูปที่ 4.101 องค์ประกอบของขบวนการเชื่อมเลเซอร์

ที่มา : TVM : Laser Beam Welding–Equipment and Principle, 2017

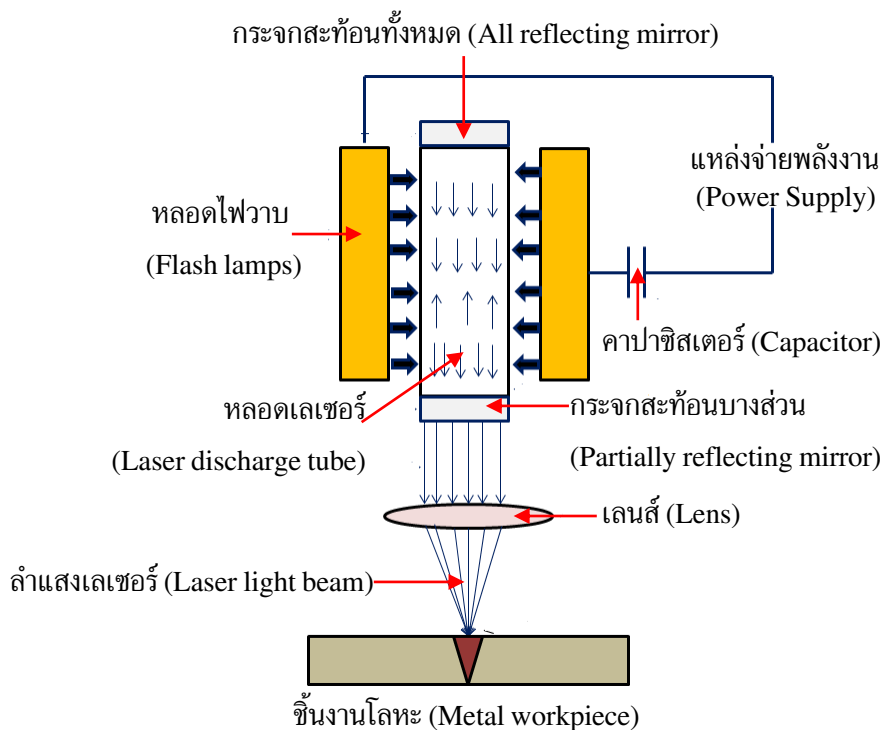
TVM Laser Beam Welding (2017) ได้อธิบายถึงระบบกลไกของการสร้างลำแสงเลเซอร์ที่เกิดขึ้นภายในหัวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.102 เมื่อรับพลังงานไฟฟ้าแรงสูง (Power supply) ป้อนเข้าสู่หลอดไฟวาบหรือหลอดไฟแฟลช (Flash lamps) หลอดไฟจะปล่อยแสงโปรตอนออกมาในหลอดเลเซอร์ (Laser discharge tube) ซึ่งพลังงานของแสงโปรตอนจะถูกดูดซับด้วยผลึกทับทิม (Rudy crystal) ทำให้พลังงานมีความเข้มของแสงมากขึ้นและหลังจากนั้นก็ถูกสะท้อนด้วยกระจก (Reflecting mirror) ผ่านไปยังเลนส์รวมแสง (Focused lens) เพื่อส่งลำแสงเลเซอร์ (Laser light beam) ไปยังตำแหน่งชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม

ชนิดของเลเซอร์ที่นิยมใช้งานกัน มี 3 ชนิด ดังนี้

1. เลเซอร์แก๊ส (Gas laser) เป็นเลเซอร์ที่ได้จากการใช้แก๊สผสมเป็นตัวกลางผลิต ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน (N) แก๊สฮีเลียม (He) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)
2. เลเซอร์ของแข็ง (Solid-state laser) เป็นเลเซอร์ที่ผลิตได้จากการใช้วัตถุของแข็งเป็นตัวกลาง ได้แก่ ผลึกทับทิมสังเคราะห์ (Chromium in aluminium oxide) นีโอไนด์ในแก้ว (Nd : Glass) และนีโอไนด์ในอลูมิเนียมยิตเรียม (Nd-YAG)
3. เลเซอร์ไฟเบอร์ (Fiber laser) เป็นเลเซอร์ที่ผลิตได้จากการใช้ใยแก้วนำแสง (Optic fiber) เป็นตัวกลาง

โดยเลเซอร์แต่ละชนิดมีหลักการกำเนิดที่แตกต่างกัน ด้วยเพราะสถานะของตัวกลางที่ใช้ผลิตแสงเลเซอร์แตกต่างกัน ดังนั้น การออกแบบหัวเชื่อม (Welding torch) ซึ่งส่วนใหญ่เรียก “Laser

welding machine” เพราะหัวเชื่อมเป็นเครื่องมือหลักที่สำคัญของการผลิตลำแสงเลเซอร์ มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน มีให้เห็นหลากหลายตามการออกแบบของผู้ผลิต



รูปที่ 4.102 ระบบกลไกของการสร้างลำแสงเลเซอร์ (Laser beam) ของหัวเชื่อม

ที่มา : TVM : Laser Beam Welding–Equipment and Principle, 2017

หัวเชื่อมเลเซอร์ (Welding torch / Welding machine)

ขบวนการเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์หัวเชื่อมถือเป็นเครื่องมือหลักที่สำคัญ เพราะเป็นอุปกรณ์ส่วนที่สร้างลำแสงเลเซอร์ขึ้นภายใน จนบางครั้งช่างเชื่อมเรียกว่า “Welding machine” เพราะบทบาทหน้าที่หลักเป็นเปรียบเสมือนเครื่องเชื่อมซึ่งภายในประกอบไปด้วยอุปกรณ์ชิ้นส่วนหลายชิ้นและมีความแม่นยำสูง ดังในรูปที่ 4.102 ขณะใช้งานจึงต้องระมัดระวังที่อาจเกิดอันตรายได้ง่าย และด้วยความหลากหลายของชนิดเลเซอร์ที่ใช้ผลิตลำแสงกับความเหมาะสมและความสะดวกของแต่ละลักษณะงานที่ต้องการเชื่อม ผู้ผลิตจึงได้มีการออกแบบหัวเชื่อมที่รองรับตามประเภทงาน สามารถแยกได้ 2 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 4.103 กล่าวคือ

1. หัวเชื่อมเลเซอร์ประเภทมือถือ (Handheld welding torch) หัวเชื่อมประเภทนี้ใช้กับคนถือเชื่อม ออกแบบมาเหมาะสมและสะดวกในการจับถือน้ำหนักเบา (ประมาณ 800–1,000 กรัม) โดยมีทั้งแบบมีระบบการเติมลวดเชื่อม (Filler rods) หรือผงโลหะ (Power metals) ลงในบ่อหลอมละลายและแบบไม่เติมลวด ซึ่งทั้งสองแบบได้แสดงเปรียบเทียบให้เห็นในรูปที่ 4.103 (ก)

2. หัวเชื่อมเลเซอร์ประเภทหุ่นยนต์ (Robot welding torch) หัวประเภทนี้ออกแบบมาเพื่อใช้ งานกับการเชื่อมโดยหุ่นยนต์/แขนกลที่เป็นการเชื่อมด้วยระบบอัตโนมัติ การออกแบบค่อนข้างซับซ้อน เพราะต้องมียุกรณ์ช่วยเสริมมากขึ้น เช่น ระบบเซ็นเซอร์ต่าง ๆ เพื่อควบคุมการทำงาน วัสดุที่ประกอบ หัวเชื่อมต้องทนต่อความร้อนได้สูง เพราะระบบหุ่นยนต์ทำงานเชื่อมได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ดัง แสดงลักษณะรูปแบบของหัวเชื่อมในรูปที่ 4.103 (ข)

หัวเชื่อมเลเซอร์จะติดตั้งหัวฉีด (Nozzle) อยู่ที่ปลายของหัวเชื่อมซึ่งทำจากโลหะทองแดงหรือ ทองแดงผสม โดยมีการออกแบบปลายของหัวฉีดที่หลากหลายรูปแบบเพื่อความสะดวกและเข้าถึง ตำแหน่งที่ต้องการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.103 (ค)



หัวเชื่อมเลเซอร์ชนิดเติมลวดเชื่อม

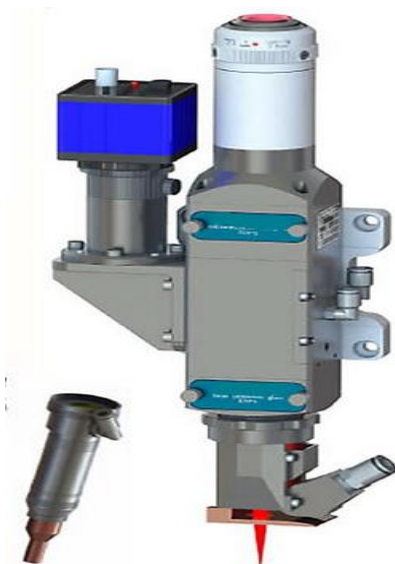
ที่มา : LASER MACH, 2021



หัวเชื่อมเลเซอร์ชนิดไม่เติมลวดเชื่อม

ที่มา : MORN LASER, 2020

(ก) หัวเชื่อมเลเซอร์ประเภทมือถือ (Handheld)



(ข) หัวเชื่อมเลเซอร์ประเภท หุ่นยนต์ (Robot)

ที่มา : LASER MACH, 2021



(ค) หัวฉีดของหัวเชื่อมเลเซอร์ (Nozzle)

ที่มา : DMK Laser welding nozzle, 2019

รูปที่ 4.103 หัวเชื่อมของกรรมวิธีการเชื่อมเลเซอร์ (Laser welding torch)

เครื่องเชื่อมเลเซอร์ (Welding machine)

เครื่องเชื่อมเลเซอร์ในที่นี้หมายถึงชุดเครื่องเชื่อมที่ออกแบบมาใช้งานตามลักษณะของงานที่ต้องการเชื่อม ซึ่งแบ่งเป็นลักษณะของเครื่องเชื่อมตามลักษณะของงานเชื่อม ดังนี้

1. เครื่องเชื่อมเลเซอร์แบบพกพา (Portable welding machine) เครื่องเชื่อมประเภทนี้ออกแบบมาเหมาะสำหรับการใช้กับงานภาคสนามที่ต้องเคลื่อนย้ายเครื่องเชื่อมไปเชื่อมงานในสถานที่ต่าง ๆ เช่น งานซ่อมหรืองานเฉพาะกิจบางอย่าง มีขนาดเครื่องเล็ก น้ำหนักเบา ไม่มีอุปกรณ์เสริม ดังแสดงลักษณะตัวอย่างของเครื่องเชื่อมแบบพกพาในรูปที่ 4.104 (ก)

2. เครื่องเชื่อมเลเซอร์เครื่องประดับ (Jewelry welding machine) เป็นเครื่องเชื่อมที่ออกแบบมาใช้กับงานเชื่อมผลิตภัณฑ์เครื่องประดับ (Jewelry) เช่น เชื่อมโลหะทอง โลหะเงิน หรือโลหะมีค่าอื่น ๆ โดยมีจุดเด่นของการเชื่อมงานที่มีขนาดเล็ก ต้องการพื้นที่รอยเชื่อมน้อย การเข้าถึงตำแหน่งเชื่อมลำบาก รอยเชื่อมมีขนาดเล็ก ๆ เป็นต้น ชุดอุปกรณ์ของเครื่องเชื่อมจะมีอุปกรณ์เสริมหลายอย่าง เช่น กล้องที่มีกำลังขยายสูง มีแท่นและอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน พร้อมคอมพิวเตอร์ควบคุมปัจจัยการเชื่อม ดังแสดงลักษณะตัวอย่างของเครื่องเชื่อมเลเซอร์เครื่องประดับ ในรูปที่ 4.104 (ข)

3. เครื่องเชื่อมเลเซอร์แบบ CNC (CNC welding machine) เป็นเครื่องเชื่อมเลเซอร์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมการผลิต โดยมีระบบของขบวนการเชื่อมที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ที่สามารถเชื่อมได้แบบอัตโนมัติ ซึ่งจะมีอุปกรณ์เสริมในขบวนการเชื่อมมากขึ้น มีความแม่นยำสูง เครื่องเชื่อมราคาค่อนข้างสูง ดังแสดงลักษณะตัวอย่างของเครื่องเชื่อมเลเซอร์ CNC ในรูปที่ 4.104 (ค)

4. เครื่องเชื่อมเลเซอร์แบบหุ่นยนต์ (Robot welding machine) เป็นเครื่องเชื่อมที่ใช้กับหุ่นยนต์หรือแขนกล เหมาะกับงานเชื่อมชิ้นส่วนยานยนต์หรืองานโรงงานผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ สามารถเชื่อมได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน มีระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมสั่งการเป็นระบบการเชื่อมที่ใช้หุ่นยนต์แทนแรงงานช่างเชื่อมได้เป็นอย่างดี ระบบการเชื่อมมีความแม่นยำสูง ดังแสดงลักษณะตัวอย่างของเครื่องเชื่อมเลเซอร์ที่ใช้กับหุ่นยนต์ ในรูปที่ 4.104 (ง)

จากที่กล่าวมาข้างต้น งานเชื่อมเลเซอร์มีทั้งลักษณะงานที่มีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ จึงได้มีการออกแบบเครื่องเชื่อมเลเซอร์ที่หลากหลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทสามารถเชื่อมได้ทั้งแบบที่ไม่ต้องการแนวเชื่อมที่ซึมลึก เรียกว่า “Heat conduction welding” หมายถึง การเชื่อมที่อาศัยหลักการนำความร้อนของโลหะที่เชื่อมแล้วเกิดการหลอมละลายแล้วทำให้เนื้อโลหะติดกัน ขณะอาร์กไม่จำเป็นต้องมีคีย์โฮล (Key hole) จะเกิดการหลอมละลายที่บริเวณผิวโลหะงาน โดยไม่ต้องการโลหะเติมเนื้อเชื่อม (Non-filler metals) โดยปกติการเชื่อมแบบไม่ซึมลึกนี้จะเป็นการเชื่อมโลหะกลุ่มประเภทงานบาง งานที่มีขนาดเล็ก ๆ เป็นต้น ดังกลไกของการเชื่อมแสดงในรูปที่ 4.105 (ก) ส่วนแบบที่ต้องการแนวเชื่อมที่มีการซึมลึกมากที่เรียกว่า “Deep penetration welding” หมายถึง การเชื่อมที่อาศัยความร้อนจากลำแสงเลเซอร์เพื่อการสร้างบ่อหลอมละลายในปริมาณที่มาก เพราะขณะอาร์กจะต้องสร้างคีย์โฮลให้มีความลึกตามที่ต้องการตามระดับของรอยซึมลึก ซึ่งขณะเชื่อมบ่อหลอมละลายจะมีพลาสมาอาร์ก

(Plasma arc) และไอของโลหะ (Metal vapor) ดังแสดงกลไกการเกิดในรูปที่ 4.105 (ข) ส่วนใหญ่แล้วจะใช้เชื่อมโลหะที่มีความหนาหรือเป็นประเภทงานที่มีขนาดใหญ่ ๆ เป็นต้น



(ก) เครื่องเชื่อมเลเซอร์แบบพกพา
(Portable welding machine)

ที่มา : IPG, Photonics , 2020



(ข) เครื่องเชื่อมเลเซอร์เครื่องประดับ
(Jewelry welding machine)

ที่มา : BCXLASER , 2020



(ค) เครื่องเชื่อมเลเซอร์แบบ CNC
(CNC welding machine)

ที่มา : LASER MACH, 2020

รูปที่ 4.104 ประเภทของเครื่องเชื่อม
เลเซอร์ตามลักษณะของงานที่เชื่อม

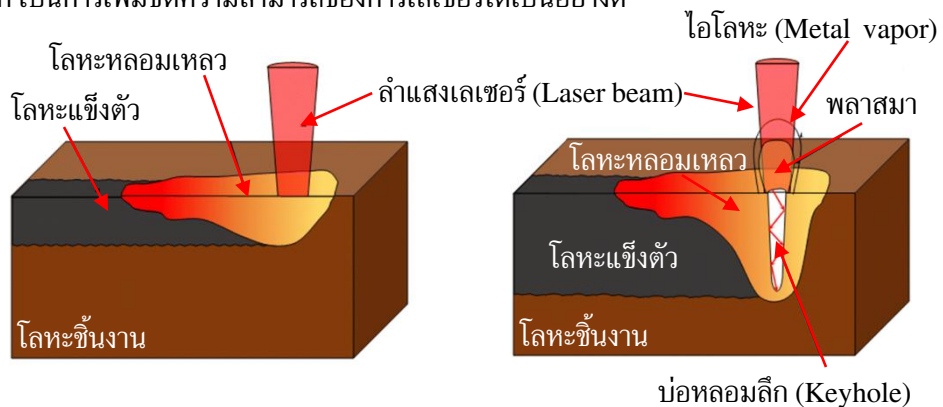


(ง) เครื่องเชื่อมเลเซอร์แบบหุ่นยนต์
(Robot welding machine)

ที่มา : KING LASER, 2021

การเชื่อมเลเซอร์สามารถเชื่อมได้ทั้งแบบไม่เติมลวด (Autogenous welding) และแบบเติมลวด (Filler metals welding) กรณีที่เชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อมจะคล้ายกับขบวนการเชื่อมทิกและขบวนการเชื่อมพลาสมาดังแสดงในรูปที่ 4.106 (ก) แต่สำหรับกรณีที่เชื่อมแบบเติมลวดจะเป็นการเติมลวดโลหะที่อาศัยวิธีการเชื่อมอื่นมาร่วมด้วย เรียกว่า การเชื่อมแบบไฮบริด (Hybrid welding) ซึ่งสามารถร่วมกับการเชื่อมทิก (GTAW) หรือ มิก/แม็ก (GMAW) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของงานแนวเชื่อมที่ต้องการและปัจจัยของการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.106 (ข) โดยทั้งสองแบบมีกลไกการควบคุมวิธีการ

และองค์ประกอบของเชื่อมที่ต่างกัน ปัจจุบันได้มีการนำกรรมวิธีการเชื่อมเลเซอร์แบบไฮบริดมาใช้งานกันมาก เป็นการเพิ่มขีดความสามารถของการเลเซอร์ได้เป็นอย่างดี



(ก) การเชื่อมเลเซอร์แบบไม่ซึมลึก

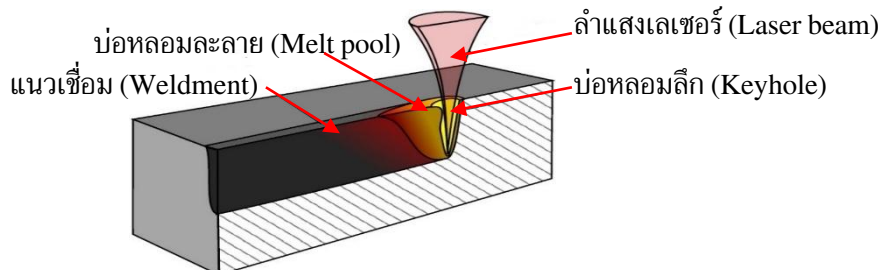
(Heat conduction welding)

(ข) การเชื่อมเลเซอร์แบบซึมลึก

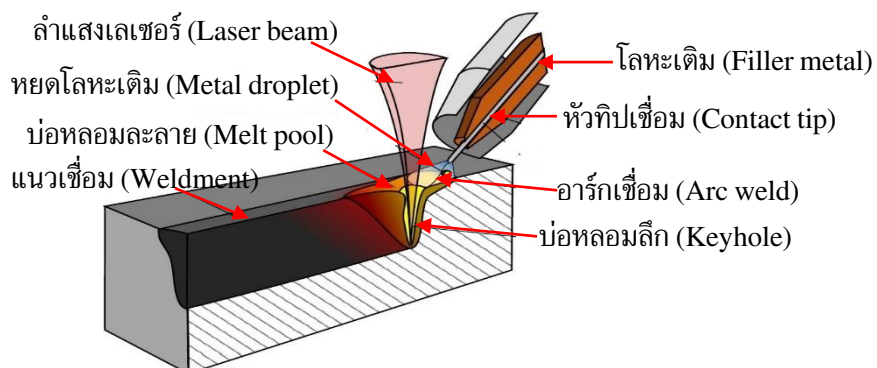
(Deep penetration welding)

รูปที่ 4.105 เปรียบเทียบวิธีการเชื่อมเลเซอร์แบบไม่ซึมลึกกับแบบซึมลึก

ที่มา : *Journal of Welding in the world*, 64, pp 611–622, 2020



(ก) กลไกการเชื่อมเลเซอร์แบบไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenous welding)



(ข) กลไกการเชื่อมเลเซอร์แบบเติมลวดเชื่อม (Filler metal welding)

รูปที่ 4.106 เปรียบเทียบกลไกของการเชื่อมเลเซอร์แบบไม่เติมลวดกับแบบเติมลวด

ที่มา : *IONIX : Laser Welding Processing*, 2018

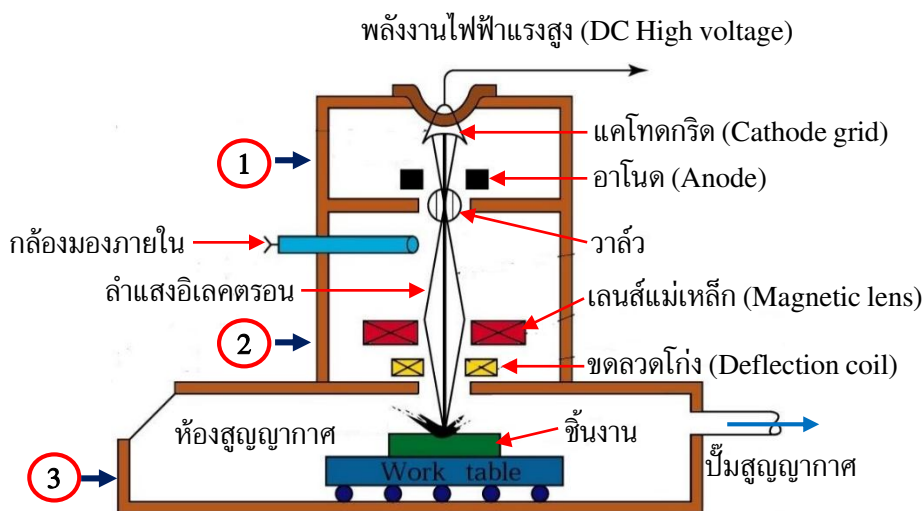
4.9 กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Welding : EBW)

P N Siddharth et al. (2020) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยของกรรมวิธีการเชื่อมนี้ และได้สรุปไว้ว่า การเชื่อมโลหะด้วยการอาร์กด้วยลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beam) จะเป็นขบวนการเชื่อมที่แตกต่างจากขบวนการเชื่อมอื่น ๆ มีระบบที่เป็นหน่วยเชื่อม (Unit welding) ดังแสดงในรูปที่ 4.107 โดยระบบประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1. เรียกว่า “Beam generation” เป็นส่วนหลักที่สร้างลำแสงอิเล็กตรอน โดยอาศัยแหล่งพลังงานไฟฟ้าแรงสูง ชนิดกระแสตรง (30 kV : DC) ป้อนเข้าสู่ระบบผ่านขั้วแคโทดและแอโนดจนเกิดเป็นพลังงานลำแสงอิเล็กตรอน

ส่วนที่ 2. เรียกว่า “Beam focusing and guidance” เป็นส่วนกลางที่รับลำแสงอิเล็กตรอนที่ผ่านวาล์วออกมาแล้วมาตกบนเลนส์แม่เหล็ก (Magnetic lens) จะเกิดการรวมลำแสงของอิเล็กตรอน ทำให้ลำแสงมีพลังงานสูงขึ้น โดยผ่านขดลวดโก่ง (Deflection coil) จะคอยควบคุมลำแสงไม่ให้กระเจิงออกไป ส่วนนี้จะมีกล้องสำหรับมองเห็นระบบการทำงานภายใน

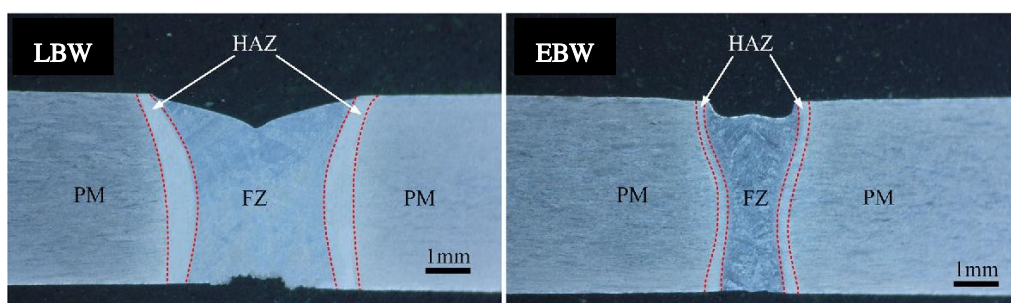
ส่วนที่ 3. เรียกว่า “Working chamber” เป็นส่วนของห้องเชื่อมชิ้นงานที่เป็นระบบสุญญากาศ (Vacuum chamber) โดยมีระบบปั๊มสร้างสุญญากาศ เหตุผลจำเป็นสำคัญที่การเชื่อมต้องทำงานภายใต้สภาวะสุญญากาศ เพราะวาล์วอิเล็กตรอนของลำแสงเมื่อปะทะกับโมเลกุลของอากาศจะเกิดการกระเจิงทำให้ประสิทธิภาพของการรวมลำแสงอิเล็กตรอนลดลง ขาดความแม่นยำและเที่ยงตรง ซึ่งถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไม่ผ่านอากาศ (Vacuum chamber) สามารถรวมลำแสงอิเล็กตรอนได้เล็กมากถึง 0.3–0.8 มิลลิเมตร ภายในห้องสุญญากาศจะมีชุดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสามารถเคลื่อนที่นำชิ้นงานเข้าและออก



รูปที่ 4.107 ระบบหน่วยเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอน (Unit welding)

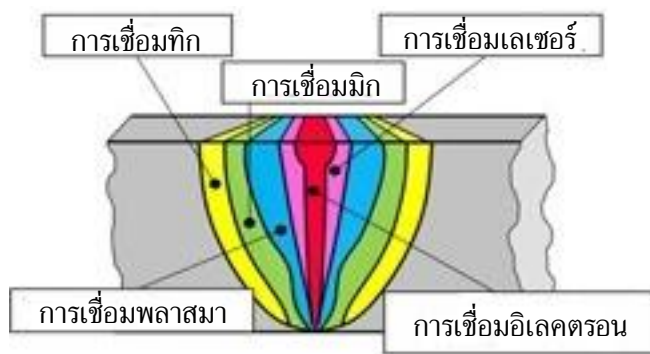
ที่มา : Mechanical Engineering : Electron Beam Machining (EBM) Principles, 2016

การเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอน (EBW) เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาเพื่อรองรับกับลักษณะงานที่ ขบวนการเชื่อมอื่น ๆ ไม่สามารถเชื่อมได้ โดยขีดความสามารถการเชื่อมคล้ายกับขบวนการเชื่อมด้วย เลเซอร์ ต่างที่การเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอนจะทำการเชื่อมในระบบสุญญากาศ และมีขนาดแนวเชื่อม ที่เกิดการหลอมละลายที่เล็กกว่าจึงเหมาะกับงานที่บางและเล็ก โดยปราศจากปัญหาอากาศเข้ามา รวมตัวกับแนวเชื่อม ดังตัวอย่าง เปรียบเทียบขนาดของแนวเชื่อมของการเชื่อมโลหะอลูมิเนียมด้วย กรรมวิธี EBW กับ LBW ในรูปที่ 4.108 จะเห็นได้ชัดเจนว่า แนวเชื่อมที่เกิดจากขบวนการเชื่อมด้วย ลำแสงอิเล็กตรอนจะมีส่วนหลอมละลาย (FZ) และโซนที่กระทบจากความร้อน (HAZ) ที่แคบและเล็ก ถ้าจะเปรียบเทียบกับขบวนการเชื่อมอื่น ๆ ดังแสดงรูปที่ 4.109



รูปที่ 4.108 เปรียบเทียบขนาดแนวเชื่อมของการเชื่อมด้วยกรรมวิธี EBW กับ LBW

ที่มา : Metal and Materials International. 2020.



รูปที่ 4.109 เปรียบเทียบขนาดแนวเชื่อมของการเชื่อมด้วยกรรมวิธี EBW กับ ขบวนการเชื่อมอื่น ๆ

ที่มา : Journal of Vacuum, Vol. 130, pp. 72–92, 2016

เครื่องเชื่อมสำหรับขบวนการเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอนจะเป็นระบบหน่วยเชื่อมที่เป็นชุดเดียวกัน (Unit welding) ไม่ได้แยกออกจากกันเหมือนขบวนการเชื่อมอื่น ๆ ด้วยเพราะขบวนการปฏิบัติการเชื่อมจะกระทำอย่างต่อเนื่องในระบบปิด ดังแสดงตัวอย่างของชุดหน่วยเครื่องเชื่อมในรูปที่ 4.110 โดยชุดหน่วยเชื่อมได้มีการออกแบบไว้หลายขนาดตามระดับของชุดสร้างระบบสุญญากาศ (Vacuum levels) ซึ่งปัจจุบันมีการเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอนในระดับของสุญญากาศ 3 ระดับ คือ

- การเชื่อมที่ระดับสุญญากาศสูง (High –vacuum welding : EBW–HV) เป็นชุดเครื่องเชื่อมที่สามารถสร้างระดับสุญญากาศได้สูง การควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนจึงมีประสิทธิภาพสูง ส่งผลให้คุณภาพของแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ ซึ่งเหมาะกับการเชื่อมงานที่ต้องการความแม่นยำสูงและเน้นคุณภาพแนวเชื่อม แต่มีต้นทุนการเชื่อมที่สูงเช่นกัน ระดับสุญญากาศอยู่ที่ 0.13 ถึง 133 MPa (10^{-6} ถึง 10^{-3} torr)

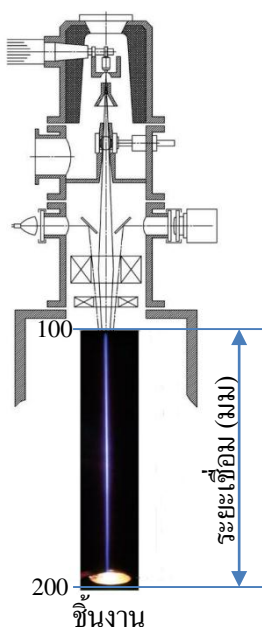
- การเชื่อมที่ระดับสุญญากาศปานกลาง (Medium –vacuum welding : EBW–MV) เป็นชุดเครื่องเชื่อมที่สร้างสุญญากาศได้ในระดับปานกลาง การควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนและคุณภาพของแนวเชื่อมก็ลดลงอยู่ในระดับปานกลาง แต่ต้นทุนการเชื่อมลดลงมาก ระดับสุญญากาศอยู่ที่ 133 ถึง 3.3×10^6 MPa (10^{-3} ถึง 25 torr)

- การเชื่อมที่ระดับสุญญากาศต่ำ/ไม่มีระบบสุญญากาศ (Non /Near atmospheric–vacuum welding : EBW–NV) เป็นชุดเครื่องเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอนที่ไม่มีระบบปั๊มสร้างสุญญากาศที่ไม่สูง เพราะต้องการบรรยากาศภายในห้องเชื่อม (Vacuum chamber) เพียงแค่ต่ำกว่าบรรยากาศเพียงเล็กน้อยหรือเท่ากับบรรยากาศ ซึ่งช่วยลดเวลาและต้นทุนของการสร้างระบบสุญญากาศได้มาก จึงเหมาะกับการเชื่อมที่ไม่ต้องการคุณภาพหรือความแม่นยำเที่ยงตรงมากนัก เพราะการควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนกระทำไม่ได้ดีในบรรยากาศที่สุญญากาศต่ำ ๆ ระดับสุญญากาศอยู่ที่ 1 atm (101.325 kPa)

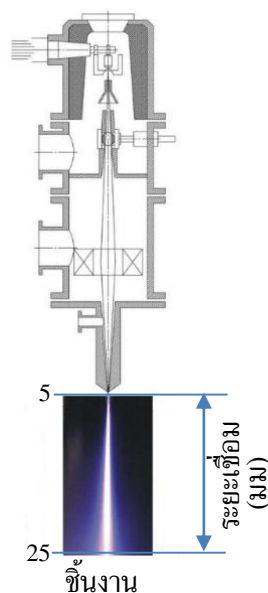
ดังนั้น การเชื่อมในห้องระบบสุญญากาศที่ระดับสูง (EBW–HV) จะเหมาะสมกับการเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอนและเหมาะกับการเชื่อมงานที่มีต้องการความแม่นยำและมีประสิทธิภาพสูง เพราะควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนได้ดี ดังแสดงเปรียบเทียบ ความแตกต่างของลำแสงอิเล็กตรอนและระยะเชื่อมที่ต่างกันของการเชื่อมภายใต้ระดับสุญญากาศสูงกับระดับสุญญากาศ (EBW–NV)ต่ำ ในรูปที่ 4.111 (ก) และ (ข) ตามลำดับ นอกจากนี้ในรูปที่ 4.111 (ค) แสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าการควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ต่ำลำแสงจะกระเจิงและโฟกัสได้ยากกว่าที่ระดับสุญญากาศสูง



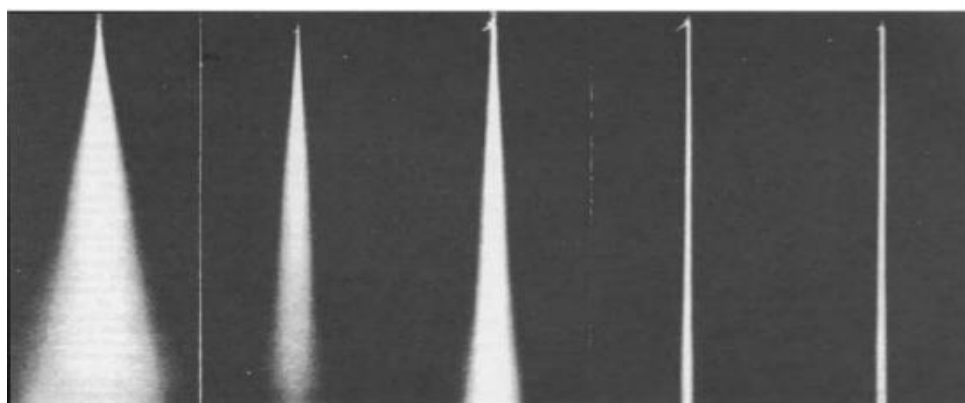
รูปที่ 4.110 ชุดระบบ
เครื่องเชื่อมลำแสง
อิเล็กตรอน (EBM)
ที่มา : PTR Precision
Technologies : Electron
beam welding system,
2008



(ก) การเชื่อมที่ระดับสุญญากาศสูง
(EBW-HV)



(ข) การเชื่อมที่ระดับสุญญากาศต่ำ/ไม่มี
(EBW-NV)



750 torr

500 torr

250 torr

50 torr

5 torr

(ค) ลักษณะของลำแสงอิเล็กตรอนที่ระดับสุญญากาศจากต่ำไปสูง

รูปที่ 4.111 เปรียบเทียบการเชื่อมลำแสงอิเล็กตรอนที่ระดับสุญญากาศต่างกัน

ที่มา : GLOBA Beam Technologies AG: Electron beam welding system, 2007

ลำดับขั้นตอนโดยปกติที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นและสิ้นสุดการเชื่อมภายในห้องเชื่อม (Chamber welding) ของขบวนการเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอน มี 4 ขั้นตอน **ดังแสดงในรูปที่ 4.112** โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน ดังนี้ โดยอ้างอิงจาก Aman P Kaur (2016)

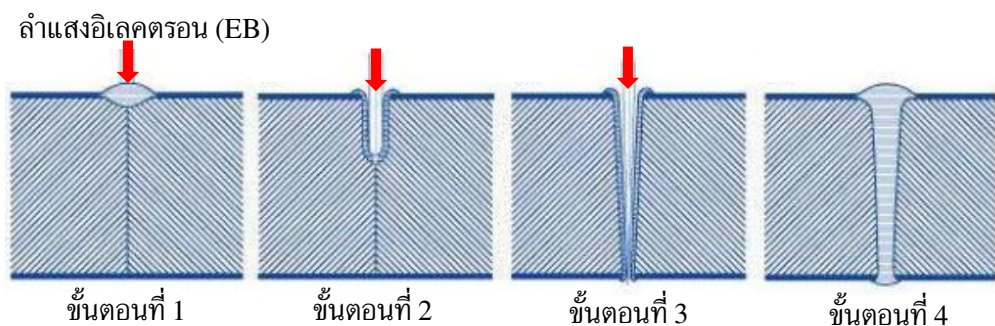
ขั้นตอนที่ 1 เมื่อนำชิ้นงานโลหะที่ต้องการเชื่อมมาจับยึดบนโต๊ะวางชิ้นงานภายในห้องเชื่อม สูญญากาศเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ลำแสงอิเล็กตรอนมากระทบกับผิวบนตำแหน่งที่ต้องการเชื่อม เกิดการเริ่มต้นหลอมละลายทันทีที่บริเวณผิวโลหะชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 2 ชิ้นงานเกิดการหลอมละลายมากขึ้น และลงไปในแนวลึกเกิดเป็นลักษณะของรูที่มีรูปคล้ายกุญแจ ที่เรียกกันว่า “Keyhole”

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนนี้รอยหลอมลึกจะมากขึ้นจนทะลุอีกด้านของชิ้นงานเชื่อม และเนื้อโลหะที่หลอมเหลวก็จะเริ่มไหลเข้ามาผสานกันตลอดความลึกของความหนาชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนนี้เนื้อโลหะที่หลอมละลายจะรวมตัวกัน และจะเริ่มแข็งตัวได้เป็นแนวเชื่อมที่สมบูรณ์

โดยลำดับขั้นตอนที่เกิดขึ้นทั้ง 4 ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นมากเพราะอัตราการหลอมเหลวด้วยลำแสงอิเล็กตรอนจะมีพลังงานความร้อนสูงมาก สามารถสร้างความร้อนได้อย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุโลหะและความหนาของโลหะที่เชื่อม



รูปที่ 4.112 ลำดับขั้นตอนการเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอน

ที่มา : Aman P Kaur : *Electron beam welding, Thesis Ph.D., 2016*

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 4

Autogenous welding – การเชื่อมต่อแบบไม่ใช้ลวดเชื่อม

ACHF welding – การเชื่อมด้วยกระแสสลับความถี่สูง

Arc force – การรักษาระยะอาร์กของการเชื่อมทิก

Beam generation – ส่วนหลักของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน

Capacitor discharge stud welding (CD Stud) – การเชื่อมสลักเกลียวแบบปล่อยประจุ

Carburizing flame – เปลวไฟเชื่อมที่คาร์บอนมาก (เปลวลด)

EBW – กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอน

EBW-HV – การเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอนที่ระดับสูญญากาศสูง

EBW-NV – การเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอนที่ระดับสูญญากาศต่ำ

Electrode collet – หัวจับล๊อคแท่งลวดทั้งสแตน

Electrode force gauge – เครื่องวัดแรงกดของการเชื่อมจุด (Spot)

Electrode mushrooming – แท่งอิเล็กโทรดที่เสียหายหัวบานคล้ายดอกเห็ด

Ferrule – หัวครอบเซรามิกส์สวมแท่งอาร์กสตั๊ด

FRW – กรรมวิธีการเชื่อมแบบเสียดทาน

Generators welding machine – เครื่องเชื่อมที่จ่ายไฟทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ (AD และ AC)

GTAW – กรรมวิธีการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุม

Heliweld / Heliarc – การเชื่อมอาร์กด้วยลวดทั้งสแตนเลสที่ใส่แก๊สฮีเลียมปกคลุม

Heterogenous welding – การเชื่อมที่ลวดเชื่อมกับโลหะงานต่างชนิดกัน

Homogenous welding – การเชื่อมที่ลวดเชื่อมกับโลหะงานเป็นชนิดเดียวกัน

Hot start – การเพิ่มกระแสขณะเริ่มอาร์กของการเชื่อมทิก

Laser – เป็นคำย่อมาจาก Light Amplification by Stimulated of Radiation

LBW – กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์

Leftward welding – การเดินหัวเชื่อมไปทางด้านซ้ายมือ

Linear friction welding : LFW – การเสียดเชื่อมทานแบบเส้นตรง

Massive electrode – แท่งขั้วอิเล็กโทรดแบบเนื้อเดียวทั้งแท่ง

Micro plasma welding machine – เครื่องเชื่อมพลาสมาสำหรับงานขนาดเล็ก

Mixing chamber – ห้องผสมแก๊สภายในหัวเชื่อม

Neutral flame – เปลวไฟเชื่อมที่คาร์บอนกับออกซิเจนสมดุล (เปลวกลาง)

Nugget diameter – ขนาดของวงกลมแนวเชื่อมจุด

OAW – กรรมวิธีการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน

Oxidizing flame – เปลวไฟเชื่อมที่ออกซิเจนมาก (เปลวเพิ่ม)

Particular area heating – การสร้างความร้อนเฉพาะตำแหน่งเชื่อม

PAW – กรรมวิธีการเชื่อมด้วยอาร์กพลาสมา

Plasma nozzle – การหุ้มควบคุมการไหลของเปลวแก๊สพลาสมา

Pressure regulator – อุปกรณ์มาวัดความดันที่ป้อนเข้าสู่หัวตัดพลาสมา

Projection – รอยเชื่อมที่เป็นปุ่มยื่นหรือนูนออกมา

Refill-FSS welding – การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบเติมเนื้อเชื่อม

Resistance flash welding : FW – การเชื่อมวาวด้วยความต้านทาน

Resistance percussion welding : PW – การเชื่อมกระทบด้วยความต้านทาน

Resistance upset welding : UW – การเชื่อมด้วยความต้านทาน

Rightward welding – การเดินหัวเชื่อมไปทางด้านขวามือ

Roller electrode – แท่งขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นแบบล้อกลม

Rotary friction welding : RFW – การเชื่อมเสียดทานแบบหมุน

RW – กรรมวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน

RWMA – สมาคมจัดแบ่งชนิดของแท่งขั้วอิเล็กโทรดของการเชื่อมความต้านทาน

Shank and Cap – แท่งขั้วอิเล็กโทรดแบบแท่งประกอบหัว

Spot welding cycles – วัฏจักรของการเชื่อมแบบจุด

Spot welding time – ระยะเวลาที่แท่งอิเล็กโทรดกดบนชิ้นงาน

STD. ACET – ข้อต่อที่ใช้กับแก๊สอะเซทิลีน

STD. OXY – ข้อต่อที่ใช้กับแก๊สออกซิเจน

Step-down transformer – เครื่องเชื่อมแบบความต้านทาน (แรงดันต่ำ-กระแสสูง)

SW – กรรมวิธีการเชื่อมสลักเกลียว

Thermit power – พลังงานเคมีสำหรับการเชื่อมเทอร์มิต

Thermit rail welding – การเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ

TIG welding – การเชื่อมอาร์กด้วยลวดทั้งสแตน

Transformer welding machine – เครื่องเชื่อมที่จ่ายไฟกระแสสลับ (AC)

Transformer-rectifiers welding machine – เครื่องเชื่อมที่จ่ายไฟกระแสตรง (DC)

Tungsten electrode – โลหะลวดทั้งสแตนสำหรับการอาร์กเชื่อม

Tungsten grinder – เครื่องมือลับมุมลวดทั้งสแตน

TW – กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิต

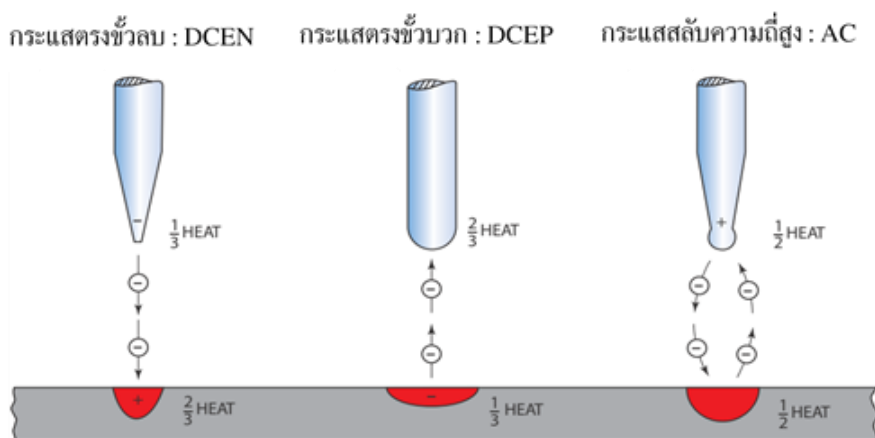
Weave patterns – รูปแบบการส่ายลวดเชื่อม

WIG – (Wolfram Inert Gas) การเชื่อมชนิดอาร์กด้วยลวดทั้งสแตนที่นิยมเรียกกันในแถบยุโรป

Working chamber – ห้องเชื่อมชิ้นงาน
สูญญากาศของการเชื่อม EBW

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 4

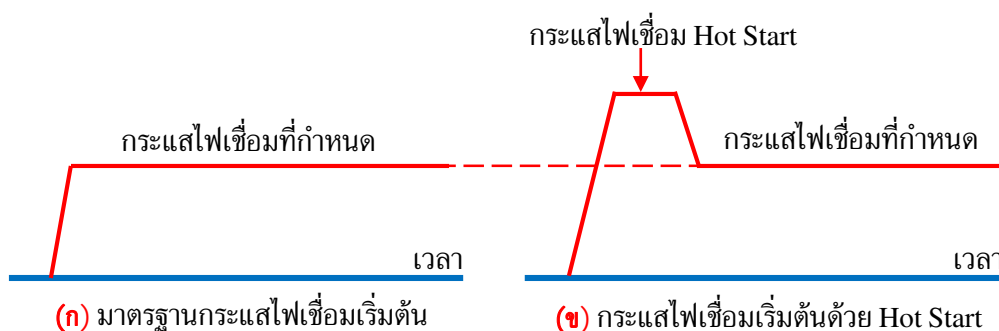
- ข้อที่ 1.** จงอธิบายหลักการเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenous) พร้อมยกตัวอย่างมา 3 กรรมวิธีการเชื่อมเพื่อประกอบการอธิบาย
- ข้อที่ 2.** จงอธิบายหลักการเชื่อมแก๊สออกซิอะเซทิลีนมาพอเข้าใจ พร้อมบอกชนิดและหลักการปรับเปลวไฟเชื่อมที่สามารถสร้างขึ้นได้ (วาดรูปประกอบการบรรยายรูปแบบของเปลวไฟเชื่อม)
- ข้อที่ 3.** จงอธิบายเทคนิคการเชื่อมแก๊สออกซิอะเซทิลีน (OAW) แบบ Leftward technique กับแบบ Rightward technique ของทั้งสองเทคนิคมาพอสังเขป
- ข้อที่ 4.** จากรูปจงอธิบายถึงพฤติกรรมกรรมการอาร์กของลวดทั้งสแตนที่มีความแตกต่างกันของกระแสไฟเชื่อม และสภาพข้อต่อที่ต่างกันของกรรมวิธีการเชื่อม GATW



เปรียบเทียบชนิดของกระแสไฟเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สปกคลุม (TIG)

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metal Fabrication*, 2012

- ข้อที่ 5.** จากรูปข้างล่างจงอธิบายลักษณะการอาร์กแบบมาตรฐานปกติกับการอาร์กด้วย Hot Start



ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metal Fabrication*, 2011

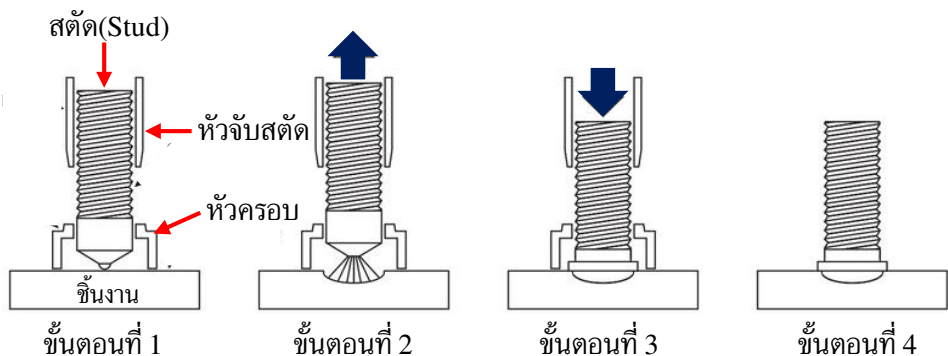
ข้อที่ 6. จงบอกวัฏจักรของการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Spot welding cycles) โดยเขียนเป็นลำดับ พร้อมวาดภาพประกอบการอธิบาย

ข้อที่ 7. จงอธิบายความเสียหายของแท่งอิเล็กโทรดที่เรียกว่า “Electrode mushrooming” (วาดภาพประกอบการอธิบาย)

ข้อที่ 8. จงอธิบายหลักการเชื่อมตะเข็บแบบแนวเชื่อมเกยทับ แบบแนวเชื่อมไม่เกยทับ และแบบแนวเชื่อมต่อเนื่องมาพอเข้าใจ และบอกถึงลักษณะของประเภทงานที่เหมาะสมกับแนวเชื่อมของแต่ละแบบมาอย่างน้อยแบบละ 2 งาน

ข้อที่ 9. จงอธิบายความแตกต่างของกรรมวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance upset welding) กับกรรมวิธีการเชื่อมวาวด้วยความต้านทาน (Resistance flash welding) (ควรยกตัวอย่างลักษณะงานประกอบการอธิบาย)

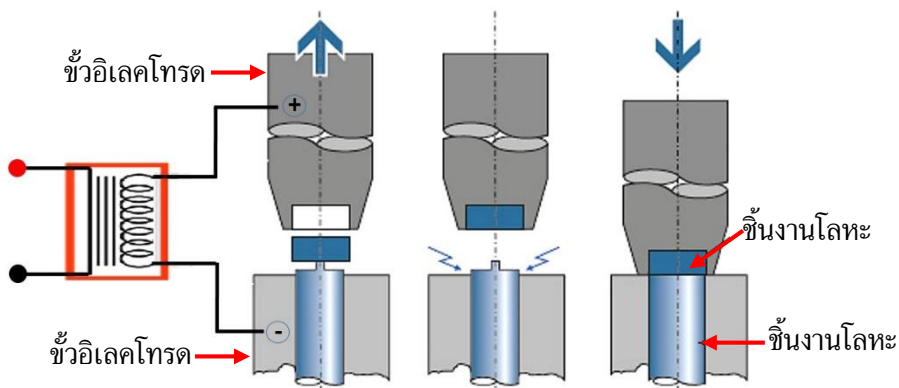
ข้อที่ 10. จากรูปข้างล่างจงอธิบายลำดับขั้นตอนของการเชื่อมสลักเกลียว (Stud arc welding)



ขั้นตอนของเทคนิคการเชื่อมสลักเกลียว/สตัดด้วยการอาร์ก (Arc stud welding)

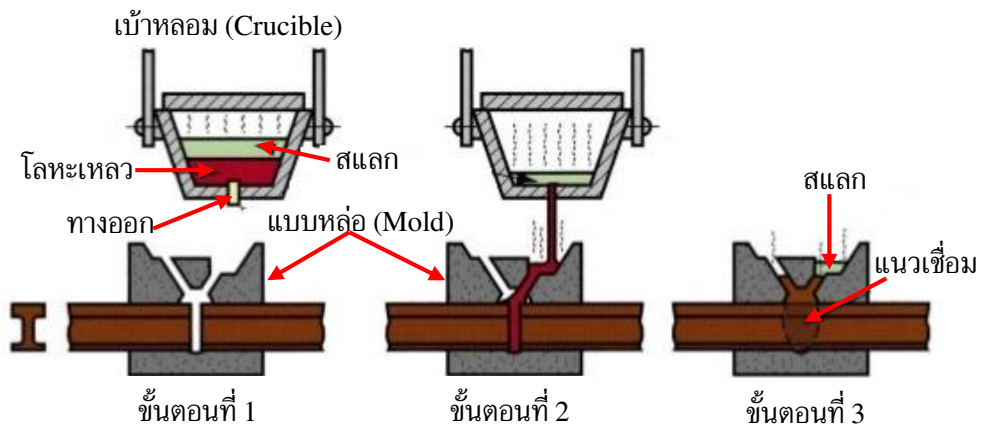
ที่มา : K. Hartz-Behrend et.al., Journal of Physic : Conference Series 550, 2014. (ปรับปรุงใหม่)

ข้อที่ 11. จงอธิบายหลักการเชื่อมกระทบด้วยความต้านทาน (Resistance percussion welding)



ที่มา : SNS Institutions, Welding Technology, 2019 (เขียนใหม่)

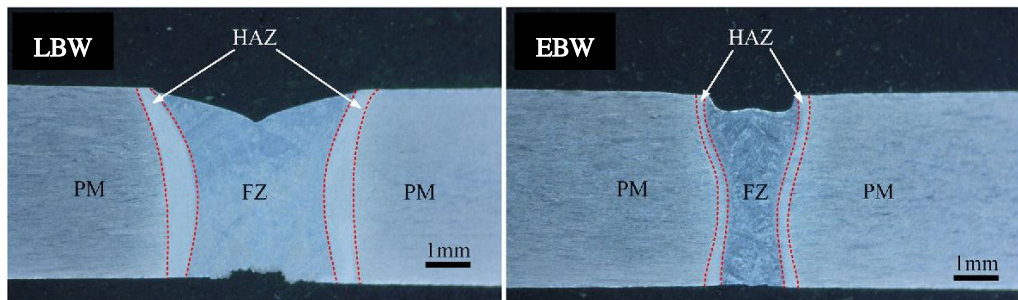
ข้อที่ 12. จงอธิบายขั้นตอนการเชื่อมเทอร์มิตรารางรถไฟ โดยอ้างอิงจากภาพข้างล่างนี้



ขั้นตอนการเชื่อมเทอร์มิตรารางรถไฟ (Thermit rail welding process)

ที่มา : *Thermit Welding : Principle, Working, Equipment and Application, 2017*

ข้อที่ 13. จงอธิบายระบบกลไกของการสร้างลำแสงเลเซอร์ (Laser beam) ภายในของหัวเชื่อม LBW
ข้อที่ 14. จงอธิบายเชิงหลักการถึงเหตุผลที่ขนาดของแนวเชื่อมต่างกันของการเชื่อม EBW กับ LBW



เปรียบเทียบขนาดแนวเชื่อมของการเชื่อมด้วยกรรมวิธี EBW กับ LBW

ที่มา : *Metal and Materials International, 2020*

บรรณานุกรมบทที่ 4

- วรพจน์ ศิริรักษ์; จรวยพร แสนทวีสุข; จริยาภรณ์ อุ๋นวงษ์ และ รุ่งวสันต์ ไกรทอง การเชื่อมเสียดทานแบบ กวนอคูมิเนียมอัลลอย : การทบทวนและมุมมองสู่อนาคต วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 23 (3) หน้า 64–82 ปี 2016
- อรรณณ สัมฤทธิ์เดชขจร; บทความ เรื่องนำรู้เกี่ยวกับ ปฏิกริยาเทอร์ไมต์วารสาร MTEC; ศูนย์ เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ มกราคม–มีนาคม 2553
- A.C. Davies. *The Science and Practice of Welding–The practice of Welding*. Publisher : Cambridge University Press. Vol.2 10th Edition, May, 2010.
- A magda, M Burca and M Lego. *Research Regarding Capacitor Discharge Stud Welding with Tip Ignition on Galvanized Thin Sheets*. Conference on Advance Materials and Structure. IOP Publishing, 2018.
- AMADA WELD TECH INC. *Fundamentals of Small Parts Resistance Welding*. 2020.
- AMADA WELD TECH INC. *Laser Welding Fundamentals*. 2020.
- Aman P Kaur. *Electron Beam Diagnosis for Weld Quality Assurance*. Thesis Ph.D., 2016.
- American Petroleum Institute (API). *Welding Processes, Inspection, and Metallurgy*. API Recommended Practice 577. 2nd Edition, December, 2013.
- American Welding Society (AWS). *Publication Catalog of Standards*, Reference Books, Online Education, and More. Summer/Fall. 2017.
- B.J. Moniz and R.T. Miller. *Welding Skills*. American Technical Publishers, INC (ATP), 2004.
- Behrouz Abnar and Hosseln Aghajani. *Thermit Welding of Aluminum Conductor by Addition of Copper*. Processding of Iran International Aluminum Conference (IIAC). May 15–16, Arak, I.R. Iran, 2012.
- Bharat Raj Singh. *A Hand Book on Friction Stir Welding*. 2012.
- BOC. *A member of the linde Group. Guideline for Welding and Cutting*. 2012.
- C.S. Wu, L. Wang, W.J. Ren, X.Y. Zhang. *Plasma Arc Welding–Process, Sensing, Control and Modeling*. Journal of Manufacturing Processes, Vol.16, 74–85, 2014.
- Camille A. Lssa and Antoine Nasr. *An Experimental Study of Welded Splices of Reinforcing Bars*. *Journal of Building and Environment*. Vol. 41, Issue 10, pp.1394–1405, 2006.
- CK Worldwide. *The Standard in TIG Welding– Technical Guide Specifications for TIG Welding*. May, 2017.

- Complete Stud Welding. *Arc Stud Welding-General & Technical Details-Section 2*, 2017.
- D.I. Pantelis. *Friction Stir Welding*. School of Naval Architecture and Marine Engineering
National Technical University of Athens Greece. Technical Meeting, May 29, 2014.
- Daniela Lohwasser and Zhan Chen. *Friction Stir Welding-From Basics to Application*.
Woodhead Publishing Limited. CRC Press. First Published, 2010.
- Eder paduan Alves, Francisco Piorino Neto, Chen Ying An. and Euclides Castorino da Silva.
*Experimental Determination of Temperture during Rotary Friction Welding of AA1050
Aluminum with AISI 304 Stainless Steel*. Journal of Aersp. Technol. Manag. Vol. 1 No.
1. Pp. 61-67, 2012.
- ENTRON Controls. LLC. *Resistance Welding Basics-Welding Sequence, Definitions,
Machine Set-Up, and Rules for Making Good Welds*. 04-2014.
- F. Khalfallah, Z. Boumerzoug, S. Rajakumar and E. Raouache. *Optimization by RSM on
Rotary Friction Welding of AA110 Aluminum Alloy and Mild Steel*. International
Review of applied Sciences and Engineering. Vol. 11 No.1 pp. 34-42, 2020.
- Girish P. Kelkar. *Process Basics and Projection Design-Projection Welding 101*. Ph.D., 2017
- GOLDSCHMIDT Smart Rail Solutions. *Original Thermit-The Best Choice for Your
Railways*. Goldschmidt Thermit GmbH, Leipzig, Germany. 2020.
- GSI SLV. *The Welding Engineer's Current Knowledge-International Welding Engineer
(IWE)*. SLV Duisburg-branch of GSI mbH. 2015.
- HOBART Filler Metals. *Guide for Aluminum Welding*. 2014.
- INTERESTING ENGINEERING- INNOVATION. *Laser Welding : Types, Advantages, and
Applications*. Aug 25, 2019.
- Jinsong Chen and Ym Zhang. *Gas Tungsten Arc Welding Using an Arcing Wire-An
Innovative GTAW Process Attains High-Speed Filler Metal Melting to Compete With
GMAW in Deposition*. Supplement to the Welding Journal, October, 2012.
- John Norrish. *Advance Welding processes-Technologies and Process Control*. Woodhead
Publishing in Materials. Published, 2006.
- K Hartz-Behrend, J L Marques et al. *Stud Arc Welding in a Mangnetic Field-Investigation
of the Influences on the Arc Motion*. Journal of Physics : Conference Series 550. IOP
Publishing, 2014.
- Kashyap Vyas. Laser Welding : *Types, Advantages, and Applications*. *Innovation*, Aug. 25,
2019.

- Larry Jeffus. *Welding and Metal Fabrication*, Delmar Dengage Learning, 2011.
- Larry Jeffus. *Welding Principles and Applications*. Fifth Edition, Thomson Delmar Learning, 2004.
- Liang CHEN and Dr. Reiichi SUZUKI. *Dissimilar Welding Process–Element Arc Spot Welding*. Kobelco Technology Review No. 36, Nov, 2018.
- Liu Yang and et.al. *Mechanical Properties and Microstructural Analysis of Rail Thermite Welding Joints*. Conference Paper, December, 2018.
- Luo Yi, Rui Wan, Xie Xiaojian and Zhu Yang. *Study on the Nugget Growth in Single Phase AC Resistance Spot Welding Base on the Calculation of Dynamic Resistance*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 229, pp. 492–500, 2016.
- M. Pouranvari. *Effect of Resistance Spot Welding Parameters on the HAZ Softening of DP980 Ferrite–Martensite Dual Phase Steel Welds*. World Applied Sciences Journal 15, Vol.10:1454–1458, 2011.
- M.C. Chaturvedi. *Welding and Joining of Aerospace Materials*. 2nd Edition, 2012.
- Malur Srinivasan. *Assessment of Resistivity Effect in Resistance butt Welding of Wire Rods*. 2007.
- Manufacturing Technology, Inc. *Rotational Friction Welding*, 2014.
- Mikhail Sokolov and Antti Salminen. *Improving Laser Beam Welding Efficiency*. Scientific
- Miller Electric Mfg.LLC. *Guideline for Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)–Processes*, 215994 F. 01–2018.
- Miller Electric Mfg.LLC. *Guideline for Resistance Sport Welding.–Processes*, 003335 E. 08–2018.
- Nasir Ahmed. *New Developments in Advanced Welding*. Wood head Publishing Limited. CRC Press. First Published, 2005.
- Nirmal S. Kalsi and Vishal S. Sharma. *A Statistical Analysis of Rotary Friction Welding of Steel with Varying Carbon in Workpieces*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer, Vol. 57, May, 2011.
- P N Siddharth and Sathiya narayanan. *A Review on Electron Beam Welding Process*. First International Conference on Advances in Physiscal in Sciences and Materials. Journal of Physics : Conference Series. IOP Publishing, 2020.

- Rafael Lucas, Jonas Reis and Luis Felipe Barbosa Marques. *Development of the Oxyacetylene Welding Process for PEI/Glass Fiber Laminates*. Welding Research–Welding Journal. Vol. 100, April, 2021.
- Rajeev Satsangi and V M Sai Prem Tammana. *Experimental Investigation of Friction Stir Welding and its Effect on Mechanical and Microstructure of Al–6063 Alloy*. International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering, Vol.3, Issue 4, April, 2018.
- Ramakant Sharma. *Thermit Welding Process, Operation and Uses : Operation and Steps (With Set-Up Diagram)*. Published July 26, 2020.
- Resistance Welding Manufacturers Alliance (RWMA). *Resistance Welding Manual*. Revised 4th Edition, 2003.
- Riccardo Campanella. *Laser Welding for Automotive Components*, Final Project of Masters’ Degree in Automotive Engineering. Politecnico Di Torino, 2019.
- Robert W. Messler, Jr. *Principles of Welding–Process, Physics, Chemistry and Metallurgy*. WILEY–VCH Verlag GmbH&Co.KGaA, Weinheim, 2004.
- Roger Timings. *Fabrication and Welding Engineering*. Published by Elsevier Ltd., 2008.
- Ruiying Zhang, Fan Jiang and Shujun Chen. *Comparison of Energy Acted on Workpiece among Twin–body Plasma Arc Welding, Non–Transferred Plasma Arc Welding and Plasma Arc Welding*. Journal of manufacturing Processes. Vol. 24, Part 1 pp. 152–160, 2016.
- RWMA–Resistance Welding Machine & Accessory. *Resistance Welding Product Catalog & Resistance Guide*. 2019.
- SanRex. *Plasma Welding Handbook*. From No. 087520PWH, 2014.
- Sergey B. Turanov and Alexey N. Yakovlev. *Laser Welding Technology*. Conference Paper. March, 2012.
- THERMAL ARC. *The Plasma Welding Handbook–Plasma the Fourth State of Matter*, 2009.
- Total Material. *Beam Welding and Thermit Welding*. Date Published, May, 2002.
- TVM. *Laser Beam Welding–Equipment, Principle, Working with Advantages and Disadvantages*. Published on May 4, 2017.
- W. M. Steen, J. Mazumder. *Laser Material Processing*. Published by Springer, 2010
- Weld Guru. *Oxy Fuel Welding (OFW)*. August 19, 2021.

Welding & NDT. *Oxy-Fuel Welding (Gas Welding/Oxy-Acetylene Welding)*. February 5, 2019.

Westermans International Ltd. *Resistance Seam Welding—Together we Weld the World*, 2013.

Y. Chen, F. Lawrence and J. Dantzig. *Heat Transfer Modelling of Rail Thermite Welding*. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineering, part F : Journal of Rail and Rapid Transit. May 1, 2006.