

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการหลอมเหล็กและสมบัติทางกลในการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045 ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบก๊าซทังสเตนอาร์ค (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW) ประกอบด้วยเนื้อหาที่สำคัญและเกี่ยวข้องในการวิจัย ดังนี้

2.1 การเชื่อมทิก (GTAW: Gas Tungsten Arc Welding)

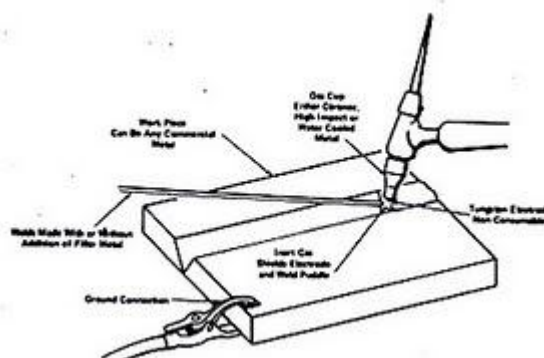
TIG ย่อมาจาก TUNGSTEN INERT GAS สมาคมการเชื่อมของอเมริกา (American welding society หรือ AWS.) เรียกขบวนการเชื่อมนี้ว่า gas tungsten arc welding โดยใช้คำย่อว่า GTAW. ซึ่งก็คือวิธีการเชื่อมที่ใช้ลวด Tungsten เป็นตัวอาร์คและใช้แก๊สเฉื่อยเป็นเกราะปกคลุมแนวเชื่อม บางตำราอาจจะเรียกขบวนการนี้ว่า Heliarc หรือ Heliweld ซึ่งเป็นชื่อดั้งเดิมของขบวนการนี้โดยใช้แก๊สฮีเลียมปกคลุมแนวเชื่อม และยังเป็นชื่อทางการค้าของบริษัทผู้ผลิตเครื่องเชื่อม TIG ในประเทศสหรัฐอเมริกาด้วย [4]

กรรมวิธีเชื่อม TIG เป็นกรรมวิธีการเชื่อมโลหะโดยใช้ชิ้นงานหลอมละลายด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นจากการอาร์คระหว่างลวดทังสเตน (Non-consumable Electrode) กับชิ้นงานเชื่อม โดยมีแก๊สเฉื่อยปกคลุมบริเวณเชื่อมและบ่อหลอมละลายเพื่อไม่ให้บรรยากาศภายนอกเข้ามาทำปฏิกิริยากับบริเวณดังกล่าว ความร้อนที่ได้จากการอาร์คสูงประมาณ 1942°C ($35,000^{\circ}\text{F}$) ในการเชื่อมนี้ลวดทังสเตนจะทำหน้าที่อาร์คเพื่อให้เกิดความร้อนเท่านั้น โดยจะไม่มีการเติมลงในแนวเชื่อม ถ้าต้องการเติมเนื้อเชื่อมต้องเติมลวดเชื่อมลงไป [4]

การเชื่อม TIG เป็นกรรมวิธีเชื่อมที่สามารถเชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิด ซึ่งรวมถึงโลหะผสม เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน, เหล็กกล้าผสม, เหล็กกล้าไร้สนิม, โลหะทนความร้อน, อะลูมิเนียมผสม, ทองแดง และทองแดงผสม เป็นต้น สำหรับตะกั่วและสังกะสีไม่ควรเชื่อม TIG เนื่องจากวัสดุทั้งสองมีจุดหลอมต่ำ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แตกต่างกับอุณหภูมิของเปลวอาร์คมาก และเมื่อวัสดุดังกล่าวหลอมละลายจะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอ ส่วนโลหะที่มีจุดหลอมสูงสามารถเชื่อมด้วย TIG ได้ดี แต่ถ้าโลหะดังกล่าวเคลือบไว้ด้วยตะกั่ว, สังกะสี, ดีบุก, แคดเมียมหรือ อะลูมิเนียมจะต้องใช้วิธีเชื่อมที่พิเศษ แนวเชื่อมของโลหะที่เคลือบนี้จะมีคุณสมบัติเชิงกลต่ำ เนื่องจากเกิดการผสมของวัสดุดังกล่าวภายในแนวเชื่อม วิธีป้องกันควรกำจัดวัสดุเคลือบบนโลหะออกก่อนที่จะทำการเชื่อม และเมื่อเชื่อมเสร็จแล้วจึงซ่อมแซมใหม่ [4]

2.1.1 กระบวนการเชื่อมแบบ TIG (Tungsten Inert Gas Arc Welding)

กระบวนการเชื่อมแบบ TIG ดังรูป 2.1 เป็นกระบวนการเชื่อมด้วยไฟฟ้า การอาร์กซึ่งทำให้เกิดความร้อนอย่างรุนแรง เกิดจากแท่งอิเล็กโทรดทังสเตนที่ไม่หลอมละลาย (Non Consumable Tungsten Electrode) กับโลหะชิ้นงาน [4]



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการเชื่อมแบบทิก (Tungsten Inert Gas Arc Welding) [4]

จากรูปที่ 2.1 บริเวณการอาร์ก ซึ่งมีบ่อหลอมละลายจะถูกปกคลุมด้วยแก๊สเฉื่อยเพื่อป้องกันไม่ให้บรรยากาศภายนอกเข้ามาทำปฏิกิริยากับแท่งทังสเตนและน้ำโลหะแนวเชื่อมทำให้การอาร์กสม่ำเสมอ เนื่องจากอิเล็กโทรดมิใช่ลวดเชื่อม แต่มีหน้าที่ทำให้เกิดการอาร์กเพื่อให้เกิดความร้อนเท่านั้น ถ้าต้องการเติมเนื้อโลหะแนวเชื่อม ก็ต้องใช้โลหะเติมหรือเรียกว่าลวดเชื่อมซึ่งลวดเชื่อมนี้จะใช้หรือไม่ใช้ก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะงาน ซึ่งจะคล้ายกับการเชื่อมด้วยแก๊สออกซิเจน-อะเซทิลีน [4]

กระบวนการเชื่อมทิก ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อเชื่อมโลหะต่างๆที่เชื่อมได้ยาก เช่น อะลูมิเนียม แมกนีเซียม เหล็กกล้าไร้สนิม ทองแดง และโลหะอื่นๆ แต่ในปัจจุบันนี้กระบวนการเชื่อมทิกเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมีการพัฒนาเครื่องเชื่อมและวิธีการเชื่อมใหม่ๆ ขึ้น ให้สามารถเชื่อมต่อโลหะได้เกือบทุกชนิด รวมทั้งโลหะผสม เหล็กกล้าไร้สนิม อะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม ทองแดงและทองแดงผสม เป็นต้น [4]

2.1.2 ข้อดีของการเชื่อมแบบ TIG (Advantages of TIG Welding)

1. ไม่ต้องใช้ฟลักซ์ แนวเชื่อมที่ได้จึงไม่จำเป็นต้องเคาะสแลก ซึ่งเป็นการตัดปัญหาในเรื่องสแลกฝังในแนวเชื่อม เพราะว่า สแลกที่ฝังอยู่ในแนวเชื่อม จะทำให้แนวเชื่อมไม่แข็งแรงและผุกร่อน ทั้งนี้การเชื่อมโดยใช้แก๊สเฉื่อยซึ่งทำหน้าที่แทนฟลักซ์สำหรับปกคลุมแนวเชื่อม ไม่ให้ออกซิเจนและไนโตรเจนจากบรรยากาศเข้ารวมตัวกับแนวเชื่อมขณะหลอมละลาย

2. ส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้น จะมีส่วนผสมเหมือนกับลวดเชื่อม จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เนื่องจากแก๊สเฉื่อยที่ปกคลุมแนวเชื่อมจะไม่รวมตัวทำปฏิกิริยากับโลหะ ดังนั้นแนวเชื่อมที่ได้จากกรรมวิธีการเชื่อมแบบ TIG จึงแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อนและเหนียวกว่าแนวเชื่อมที่ได้จากกรรมวิธีอื่นๆ
3. สามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม
4. สามารถมองเห็นแนวเชื่อมและบ่อหลอมละลายได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการอาร์คที่เกิดขึ้นสะอาด ไม่มีควันและสเปกปฏิกิริยา
5. การเชื่อม TIG ให้ความร้อนสูงและเป็นบริเวณแคบ จึงไม่ทำให้ความร้อนในงานเชื่อมแผ่กระจายกว้างเกินไป งานจึงมีโอกาสบิดตัวน้อย
6. ไม่มีเม็ดโลหะ (spatter) เกิดขึ้นที่บริเวณแนวเชื่อม เนื่องจากการเชื่อม TIG ไม่มีการส่งผ่านน้ำโลหะลวดเชื่อมข้ามบริเวณอาร์คสู่บ่อหลอมละลาย
7. สามารถเชื่อมต่อเหล็กเหนียวที่มีความหนาแตกต่างกันได้
8. สามารถควบคุมแนวเชื่อมได้ง่าย

2.1.3 ข้อเสียของการเชื่อมโลหะแบบ TIG

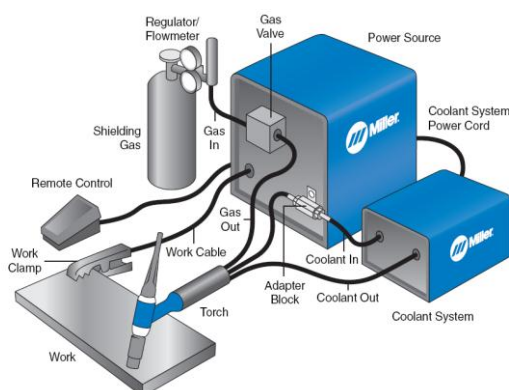
1. ความเร็วในการเชื่อมจะช้ากว่าวิธีอื่นๆ
2. ช่วงเชื่อมจะต้องมีทักษะที่ดี มือและสายตาจะต้องมีความสัมพันธ์กัน
3. รังสีจากการเชื่อมจะมีความสว่างและแรงกว่าเครื่องเชื่อมอื่นๆ
4. เครื่องเชื่อมและอุปกรณ์มีราคาแพง

2.1.4 หลักของวิธีการเชื่อมโลหะแบบ TIG

หลักการทั่วไปคล้ายกับการเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้า คือการให้ความร้อนทำให้โลหะหลอมละลายนั้น เกิดจากการอาร์คระหว่างอิเล็กโทรด (Tungsten Electrode) กับชิ้นงาน ขณะเดียวกันบริเวณที่เกิดการเชื่อมจะมีแก๊สเฉื่อย (Inert Gas) ปกคลุมบริเวณนั้น ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้แก๊สอาร์กอนเพื่อป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) คือ ออกซิเจน ไนโตรเจน และความชื้นในอากาศเข้ามารวมกับโลหะที่กำลังหลอมละลาย เมื่อเกิดความร้อนจากการเชื่อมชิ้นงานจะหลอมละลายจนเกิดเป็นบ่อหลอมละลาย (Puddle) ขึ้นเมื่อบ่อหลอมละลายเกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อใดๆ ก็จะทำให้ขอบของชิ้นงานนั้นหลอมละลายติดกัน แต่เนื่องจากทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรดเป็นวัสดุที่ไม่ละลายหรือสิ้นเปลือง (Non Consumable Electrode) จึงจำเป็นที่จะต้องเติมลวดเชื่อม (Filler Metal) ลงไปในบ่อหลอมละลายนั้นด้วยแต่ในกรณีที่ทำกรเชื่อมโลหะบางๆ จะไม่เติมลวดลงในบ่อหลอมละลายเลยก็ได้ [2]

2.1.5 อุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการเชื่อมด้วยวิธี TIG [2]

1. เครื่องเชื่อม (Power Source)
2. หัวเชื่อม (Torch)
3. อิเล็กโทรดทังสเตน (Electrode Tungsten)
4. แก๊สปกคลุม (Shielding Gas) หรือแก๊สเฉื่อย (Inert Gas)
5. อุปกรณ์ปรับความดัน (Regulator)
6. ลวดเชื่อม (Filler Metal)



รูปที่ 2.2 แสดงภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อม [2]

2.1.5.1 เครื่องเชื่อม (Power Source)

ปัจจุบันเครื่องเชื่อมที่ถูกต้องออกแบบขึ้น ด้วยเทคโนโลยีที่สูงขึ้น แล้วแต่บริษัทผู้ผลิตจะสร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีใด แต่พื้นฐานการทำงานของเครื่องเชื่อมที่ยังคงใช้หลักการแบบเครื่องเชื่อมกระแสคงที่ (Constant Current) ซึ่งมีทั้งไฟกระแสตรงและกระแสสลับ และโดยทั่วไปเครื่องเชื่อมที่กะจะมีกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือรวมอยู่ด้วย

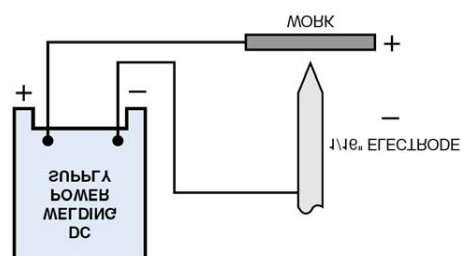
เครื่องเชื่อม TIG เป็นเครื่องเชื่อมที่ออกแบบเป็นพิเศษ ซึ่งจะต้องมีระบบความถี่สูง (H.F.) และสวิตช์อัตโนมัติสำหรับควบคุมการไหลของแก๊สและน้ำ เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ในการหลอมละลาย ในการเชื่อมและการระบายความร้อนของหัวเชื่อมรวมอยู่ในเครื่องด้วย โดยทั่วไปเครื่องเชื่อมจะเป็นแบบ Transformer Rectifier หรือเป็นแบบ Generator ขับด้วยมอเตอร์หรือเครื่องยนต์ก็ได้ ซึ่งในแบบ Transformer Rectifier จะสามารถเลือกกระแสไฟฟ้าเชื่อมตามลักษณะของงานได้ เครื่องเชื่อมที่ใช้กัน มีขนาดตั้งแต่ 3-350 แอมป์ บางเครื่องพิเศษมีตั้งแต่ครึ่งแอมป์เปร์ถึง 800 แอมป์เปร์ และมี Duty Cycle 60 เปอร์เซ็นต์



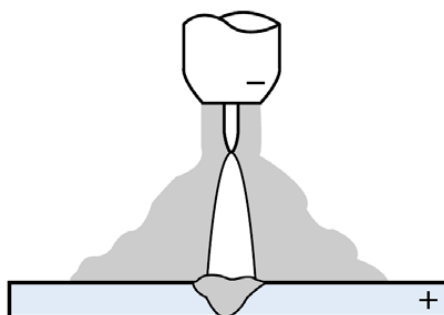
รูปที่ 2.3 แสดงภาพเครื่องเชื่อมทิก [2]

ระบบกระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อม TIG นั้น มี 3 ประเภทด้วยกันคือ

1. กระแสตรงขั้วตรง (Direct Current Straight Polarity : D.C.S.P.) หัวเชื่อมหรือ อิเล็กโทรดจะเป็นขั้วลบ ส่วนขั้วบวกจะจับที่ชิ้นงาน ประจุไฟฟ้าลบไหลจากหัวเชื่อมอิเล็กโทรดไปสู่ชิ้นงานดังแสดงในรูป 2.4 ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นที่ชิ้นงานจะมาก โดยจะเกิดที่ชิ้นงาน 70% และเกิดที่อิเล็กโทรด 30% แนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแคบแต่กินลึกมาก กระแสไฟแบบนี้จะใช้ในการเชื่อมเหล็กทั่วไป เหล็กกล้าไร้สนิม และไททานเนียม

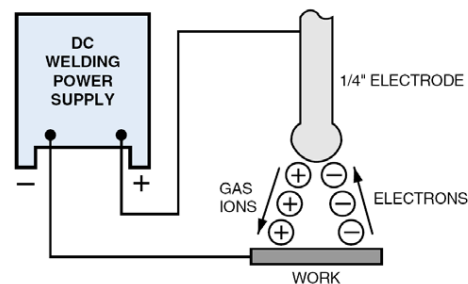


รูปที่ 2.4 แสดงขั้วของกระแสไฟฟ้าที่หัวเชื่อมและชิ้นงานในการเชื่อมแบบ D.C.S.P [2]

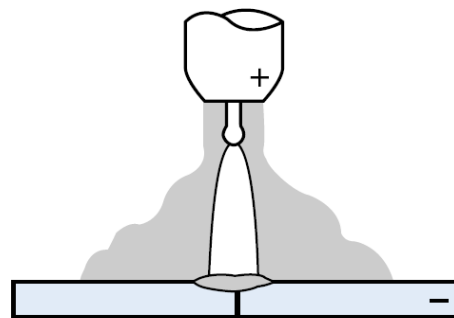


รูปที่ 2.5 แสดงแนวเชื่อมที่แคบและลึกในการเชื่อมแบบ D.C.S.P [2]

2. กระแสตรงกลับขั้ว (Direct Current Reverse Polarity) D.C.R.P. หัวเชื่อมหรืออิเล็กโทรดจะเป็นขั้วบวก ส่วนขั้วลบจะจับที่ชิ้นงาน ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นที่หัวเชื่อมจะมีมากจึงจำเป็นต้องใช้ทั้งสแตนที่มีขนาดใหญ่กว่าเพราะเหตุว่า ถ้าหากความร้อนที่เกิดขึ้นที่ปลายทั้งสแตนอิเล็กโทรดมีมากก็จะทำให้ปลายทั้งสแตนอิเล็กโทรดเกิดการละลายแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะกว้างแต่ไม่ลึก



รูปที่ 2.6 แสดงขั้วของกระแสไฟฟ้าที่หัวเชื่อมและชิ้นงานในการเชื่อมแบบ D.C.R.P [2]



รูปที่ 2.7 แสดงแนวเชื่อมที่กว้างแต่ไม่ลึกในการเชื่อมแบบ D.C.R.P [2]

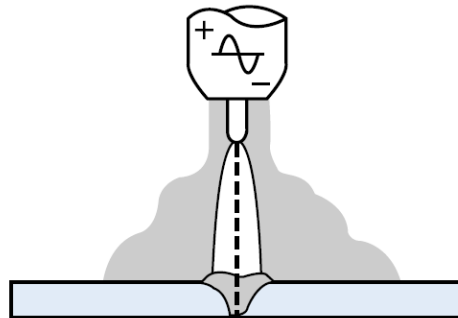
เครื่องเชื่อมที่จ่ายกระแสไฟตรง ช่วงเชื่อมต้องต่อขั้วให้ถูกต้อง ซึ่งมีทั้งกระแสไฟตรงขั้วบวก (Direct Current Reversed Polarity: DCRP) และกระแสไฟตรงขั้วลบ (Direct Current Straight Polarity : DCSP) มีการใช้งาน ที่แตกต่างกันดังนี้ [2]

1. ติดตั้งเครื่องเชื่อมเป็นขั้วลบ อิเลคตรอนจะไหลจากอิเล็กโทรดไปยังชิ้นงาน ความร้อนที่ชิ้นงานจึงมีมากกว่าความร้อนที่อิเล็กโทรด (ร้อยละ 70 เกิดที่ชิ้นงาน ร้อยละ 30 เกิดที่อิเล็กโทรด)
2. ติดตั้งเครื่องเชื่อมเป็นขั้วบวก อิเล็กโทรดจะไหลจากชิ้นงานไปยังอิเล็กโทรด ความร้อนที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรด จึงมีมากกว่าความร้อนที่บนชิ้นงาน (ร้อยละ 70 เกิดที่อิเล็กโทรด ร้อยละ 30 เกิดที่ชิ้นงาน)

กระแสไฟตรงขั้วบวกต้องใช้อิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโตกว่าขั้วลบ แต่ใช้กระแสไฟต่ำกว่า ทำให้รูปร่างของแนวเชื่อมที่มีลักษณะกว้างและการซึมลึกตื้น (Shallow Penetration Wide Weld)

แต่มีการมาใช้งานเชื่อมแบบ TIG น้อยมาก กระแสไฟตรงขั้วลบต้องใช้ขี้อเล็กโตรดที่มีขนาดเล็กกว่า ใช้กระแสไฟสูงกว่า รูปร่างแนวเชื่อมแคบและการซึมลึกมาก (Deep Penetration-Narrow Weld) เชื่อมงานได้รวดเร็วและลดการบิด ผิดรูปของชิ้นงาน โดยใช้เชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิด ยกเว้นอะลูมิเนียมและแมกนีเซียม

3. กระแสสลับความถี่สูง (Alternating Current & High Frequency) หลักการทำงานนี้จะเห็นว่าในครึ่งไซเคิลแรกของการเชื่อม ขณะที่หัวเชื่อมทั้งสองเป็นขั้วบวก ที่หัวเชื่อมจะมีความร้อนสูง ในช่วงนี้จะต้องทำการกำจัดออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงานออกไปจากบริเวณที่ถูกเชื่อมส่วนในครึ่งไซเคิลหลัง ที่ชิ้นงานจะเกิดความร้อนสูง จึงทำให้เกิดเป็นบ่อหลอมละลายขึ้น (Puddle) แต่ความเป็นจริงแล้วออกไซด์และความชื้น จะเป็นฉนวนกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าผ่านจากทั้งสองขั้วอิเล็กโตรดไปยังชิ้นงานได้สะดวก ดังนั้นกระแสไฟฟ้าความถี่สูง (High Frequency) อย่างต่อเนื่องจะเป็นตัวที่สามารถขจัดผิวออกไซด์บนชิ้นงานได้ดี ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดที่ชิ้นงาน 50% และทั้งสองขั้วอิเล็กโตรด 50% และแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจะไม่กว้างมากหรือไม่ลึกจนเกินไป ซึ่งจะเหมาะในการเชื่อมอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมได้ดี



รูปที่ 2.8 แสดงแสดงผิวของชิ้นงานในการเชื่อมแบบ D.C.R.P. [2]

การเลือกใช้กระแสไฟแบบกระแสตรงหรือกระแสสลับนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะชิ้นงานที่นำมาเชื่อม กระแสสลับจะเหมาะและเชื่อมได้ดีกับอะลูมิเนียมและแมกนีเซียม ส่วนกระแสตรงใช้ได้กับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กหล่อ เหล็กกล้าอะลูมิเนียม ทองแดง นิกเกิล และนิกเกิลผสมเป็นต้น เครื่องเชื่อมทิกปัจจุบันได้ออกแบบให้มีช่วงของกระแส 0.5-500 แอมแปร์ และ อาร์คโวลต์เตจ 10-30 โวลต์ 60% Duty Cycle

2.1.5.2 หัวเชื่อม TIG (TIG Welding Torch)

หัวเชื่อมที่ใช้สำหรับการเชื่อมด้วยวิธี TIG มีชื่อเรียกว่า Torch เป็นตัวสำหรับจับยึดทั้งสองขั้วอิเล็กโตรด ประกบกันหน้ากัน มีด้วยกัน 2 ระบบ คือ

1. ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air-Cooled Torch) ถูกนำมาใช้งานเชื่อมโลหะบาง ใช้กระแสไฟต่ำ และใช้กับงานเชื่อมที่มีระยะเวลาเชื่อมสั้นๆ การระบายความร้อนอาศัยอากาศโดยรอบเป็นตัวระบายความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.9

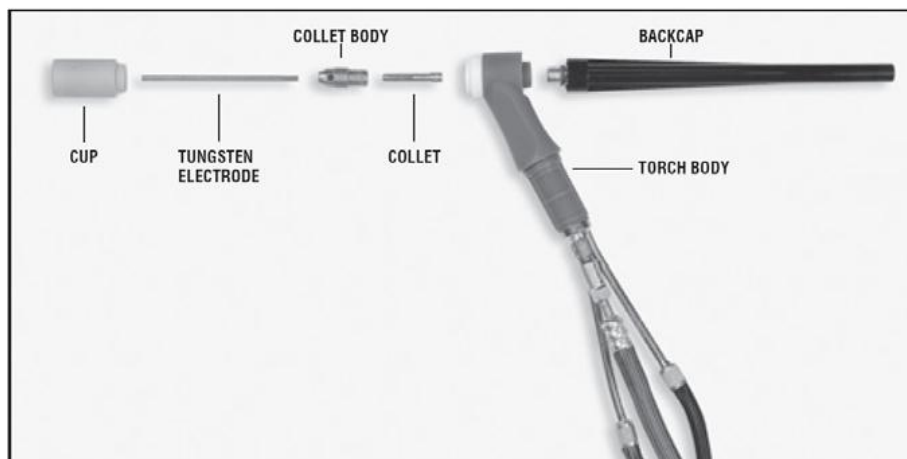


รูปที่ 2.9 แสดงชิ้นส่วนที่ประกอบในหัวเชื่อมแบบ TIG ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ [3]

2. ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water-Cooled Torch) เหมาะสำหรับงานเชื่อมที่ต้องใช้กระแสไฟสูง (สูงกว่า 200 แอมป์แปรขึ้นไป) และเชื่อมติดต่อกันเวลานานๆ หัวเชื่อมมีหน้าที่สำคัญสรุปได้ดังนี้

1. เป็นส่วนที่ใช้จับขณะเชื่อม
2. ใช้เป็นหัวจับอิเล็กโทรดทั้งสแตน
3. เป็นทางผ่านของแก๊สปกคลุมเพื่อไหลไปปกคลุมบริเวณการอาร์ก
4. เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าสู่บริเวณการอาร์ก
5. ใช้เป็นทางผ่านของน้ำที่ไหลมาระบายความร้อนภายในหัวเชื่อม

ส่วนประกอบของหัวเชื่อม ประกอบด้วยชิ้นส่วนต่างๆ ที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 อุปกรณ์เหล่านี้สามารถถอดออกสับเปลี่ยนขนาดได้ตามความเหมาะสม มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.10 แสดงชิ้นส่วนที่ประกอบในหัวเชื่อมแบบ TIG ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ [2]

1. ส่วนลำตัวของหัวเชื่อม (Torch Body) เป็นชิ้นส่วนหลักของหัวเชื่อม ทำด้วยทองแดงผสม เป็นทางผ่านของแก๊สปกคลุมและน้ำที่ไประบายความร้อน และกระแสไฟเชื่อม โดยมีวัสดุที่เป็นฉนวนหุ้มห่ออย่างดี
2. อุปกรณ์จับยึดแท่งทั้งสแตน (Collet) ใช้จับยึดแท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตนมีขนาดต่างๆ กัน จะต้องเลือกให้เหมาะกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งทั้งสแตนใช้คู่กับ Clamping Nut
3. อุปกรณ์บีบจับแท่งทั้งสแตน (Collet Body) เป็นอุปกรณ์ซึ่งประกอบยึดด้วยเกลียวต่อจากส่วน ลำตัวของหัวเชื่อมทำหน้าที่บีบจับ (Collets) ให้จับยึดแท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตนได้แน่นขึ้น
4. ครอบบน (Back Cap) เป็นอุปกรณ์ส่วนบนสุดของหัวเชื่อม ทำหน้าที่ครอบแท่งอิเล็กโทรด ทั้งสแตน และป้องกันการไหลของแก๊สปกคลุม มีขนาดความยาวต่างๆ กันตามขนาดของแท่ง อิเล็กโทรดทั้งสแตน
5. หัวครอบ (Nozzle) เป็นชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ที่ครอบอยู่ล่างสุดของหัวเชื่อมใกล้ผิวหน้า ชิ้นงาน ทำหน้าที่ป้องกันอิเล็กโทรดทั้งสแตน และบังคับให้แก๊สปกคลุมไหลตรงไปยังบริเวณอาร์ก ขณะทำการเชื่อม
6. อิเล็กโทรดทั้งสแตน [5] ทำจากโลหะทั้งสแตนและโลหะทั้งสแตนผสม โดยโลหะทั้งสแตน เป็นโลหะที่มีจุดหลอมละลาย (Melting Point) สูงมาก ($3,140^{\circ}\text{C}$) ซึ่งจะสูงกว่าโลหะ ชนิดอื่นๆ โลหะ ทั้งสแตนผสมจะผสมด้วยโลหะธาตุทอเรียม (Thorium) หรือเซอร์โคเนียม (Zirconium) อิเล็กโทรด ทั้งสแตนในการเชื่อมแบบ TIG จะทำหน้าที่ให้เกิดการอาร์ก ไม่ใช่โลหะเดิมหรือลวดเชื่อม จึงเป็น อิเล็กโทรดที่ไม่หลอมละลายขนาดอิเล็กโทรดทั้งสแตนมีหลายขนาด ซึ่งมีขนาดความโตวัดที่ เส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.010, 0.020, 0.040, 1/4 , 1/8 , 1/16 , 3/16 , 3/32 และ 5/32 นิ้ว ขนาดความยาว ตั้งแต่ 3, 6, 7, 18 และ 24 นิ้ว อิเล็กโทรดทั้งสแตนจะต้องปราศจากสิ่งสกปรกติดที่ผิวลวด ไม่มีรอยแตก และสแตกฝังใน เพราะจะทำให้แนวเชื่อมที่ได้มีคุณภาพต่ำ ผิวอิเล็กโทรดทั้งสแตนมี 2 ลักษณะ คือ แบบผิวเจียรไนกับแบบผิวล้างด้วยน้ำยาเคมี ซึ่งแบบผิวเจียรไนจะมีผิวเป็นมันได้มาตรฐานและ ราคาสูงกว่าแบบผิวที่ล้างด้วยน้ำยาเคมี

ขนาดของกระแสไฟในการเชื่อมแบบ TIG จะมากหรือน้อยขึ้นกับอยู่กับชนิดและขนาดของชิ้นงาน การออกแบบรอยต่อ ตำแหน่งทำเชื่อม ชนิดของแก๊สปกคลุม และชนิดของหัวเชื่อม เป็นต้น ความสามารถในการนำกระแสไฟเชื่อมของอิเล็กโทรดทั้งสแตน ในแต่ละขนาดขึ้นอยู่กับชนิดและข้อ ของกระแสไฟด้วยคือ กระแสไฟตรงขั้วลบมีความสามารถในการนำกระแสไฟเชื่อมได้มากที่สุดแต่ว่า จะนำกระแสไฟได้น้อยลงเมื่อใช้กระแสสลับ และจะนำกระแสไฟได้น้อยที่สุดเมื่อใช้กระแสไฟตรงขั้วบวก อิเล็กโทรดทั้งสแตน มีด้วยกันหลายขนาด ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของทั้งสแตนอิลีกโทรดตาม AWS - ASTM [2]

ชื่อเรียก		อักษรย่อ	สี
1	ทั้งสแตนบริสุทธิ์ Pure Tungsten	EWP	เขียว
2	ทั้งสแตนผสมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ 1% Tungsten with 1% Zirconium Dioxide (ZrO_2)	EWZr	น้ำตาล
3	ทั้งสแตนผสมทอเรียมไดออกไซด์ 1% Tungsten with 1% Thorium Dioxide (ThO_2)	EWTh-1	เหลือง
4	ทั้งสแตนผสมทอเรียมไดออกไซด์ 2% Tungsten with 2% Thorium Dioxide (ThO_2)	EWTh-2	แดง

E = Electrode, W = Tungsten

ชนิดและขนาดของอิลีกโทรดทั้งสแตนมีความสำคัญคือ ช่วยให้คุณภาพของชิ้นงานดีตามที่ต้องการ ถ้าได้ขนาดที่เหมาะสม รวมทั้งจะต้องรู้ถึงกระแสไฟเชื่อม (แอมป์แปร์) สำหรับทั้งสแตนนี้ด้วย เพราะทำให้ส่วนปลายของทั้งสแตนไม่ถูกทำลายจากการเชื่อม ความแตกต่างและข้อดีข้อเสียของอิลีกโทรดแต่ละชนิดดังนี้ [2]

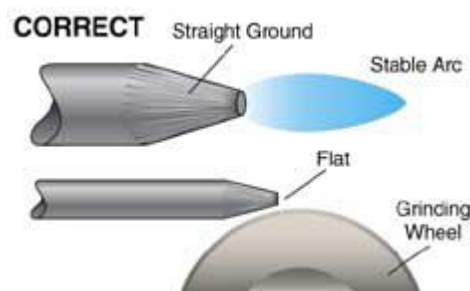
1. ทั้งสแตนบริสุทธิ์ (Pure Tungsten) ราคาจะถูกกว่าชนิดอื่นๆ คุณภาพในการใช้งานพอใช้ และนิยมใช้กันทั่วไป ใช้ลวดทั้งสแตนบริสุทธิ์ สัญลักษณ์คือ EWP (Electrode Welding Pure Tungsten) จะมีโค้ดสีที่ปลายลวดสีเขียว ปกติจะใช้กับกระแสไฟสลับในการเชื่อมอะลูมิเนียมและแมกนีเซียม ปลายลวดต้องต้องแต่งให้มนหรือทำให้ละลายกลมเป็นลูกฟุตบอล ลักษณะการอาร์ก จะนิ่มสม่ำเสมอ โดยใช้แก๊สอาร์กอนหรือฮีเลียมเป็นแก๊สปกคลุม อิลีกโทรดทั้งสแตนบริสุทธิ์ถ้าใช้กับไฟฟ้ากระแสตรง ความสามารถนำกระแสไฟจะลดลง และมีโอกาสละลายเป็นเม็ดหยดผ่านการอาร์กไปผสมกับโลหะแนวเชื่อมได้ง่ายกว่าลวดทั้งสแตนผสม

2. ทอริเอตเต็ดทั้งสแตน (Thoriated Tungsten) เป็นอิลีกโทรดทั้งสแตนที่ผสมด้วยโลหะทอริยม โค้ดปลายลวดสีเหลือง สัญลักษณ์คือ EWTh-1 สำหรับทั้งสแตนที่ผสมทอริยมร้อยละ 1 และสีแดง สำหรับทั้งสแตนที่ผสมทอริยม 2% สัญลักษณ์คือ EWTh-2 การนำโลหะทอริยมผสมกับลวดทั้งสแตนจำนวนเพียงเล็กน้อย จะทำให้คุณภาพในการแตกตัวของอิลีกตรอนดีขึ้นมีผลทำให้การเริ่มต้นการอาร์กดีขึ้นด้วย และมีความสามารถในการนำกระแสไฟได้ในปริมาณสูง ส่วนผสมของทอริยมร้อยละ 1-2 จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าได้สูงขึ้นถึงร้อยละ 50 กระแสไฟฟ้าจะไหลได้ดี ทำให้ง่ายต่อการการเริ่มต้นอาร์ก เปลวอาร์กจะคงที่โดยที่อายุการใช้งานชนิดโลหะทอริยมผสมกับลวดทั้งสแตนร้อยละ 1 จะยาวกว่าชนิดร้อยละ 2 ทอริเอตทั้งสแตน เหมาะกับการเชื่อม

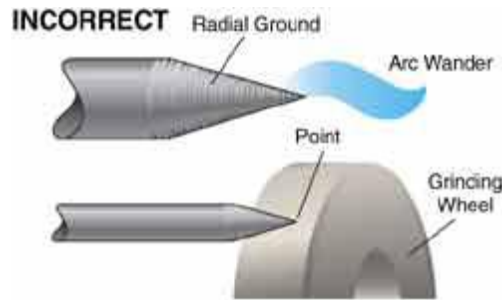
เหล็กทั่วไป ด้วยกระแสไฟตรงและต้องดับแต่งปลายลวดให้เรียบแหลมโดยเฉพาะใช้กับกระแสไฟตรงขั้วลบ ลวดทอริเอตเต็ดทั้งสแตนรอยละ 2 จะเป็นชนิดใช้กันแพร่หลายมาก

ทอริเอตเต็ดทั้งสแตนอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะพิเศษคือ นำเอาลวดทอริเอตเต็ดทั้งสแตนมาอัดรวมไว้ในลวดทั้งสแตนบริสุทธิ์ให้กลายเป็นอิเล็กโทรดชนิดใหม่ โดยใช้ลวดทอริเอตเต็ดเพียง 41 ของพื้นที่หน้าตัดตลอดความยาวของลวด เป็นลวดทั้งสแตนผสมที่มีคุณสมบัติเริ่มต้นการอาร์กได้ดี กระแสไฟไหลผ่านได้มาก และรักษารูปทรงลักษณะมนกลมของปลายลวดได้ดี ใช้ได้ดีกับการเชื่อมโลหะอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมด้วยกระแสไฟฟ้าสลับหรือใช้กระแสตรงได้ โถดที่ปลายลวดเป็นสีน้ำเงิน

3. เซอร์โคเนตเต็ดทั้งสแตน (Zirconiated Tungsten) อิเล็กโทรดทั้งสแตนที่มีเซอร์โคเนียมผสมอยู่ร้อยละ 0.3-0.5 โถดปลายลวดสีน้ำตาล เหมาะแก่กระแสไฟฟ้าสลับความถี่สูงโดยเฉพาะปลายลวด จึงต้องแต่งให้เป็นลักษณะปลายมนกลม เหมือนลวดอิเล็กโทรดทั้งสแตนบริสุทธิ์ซึ่งอิเล็กโทรดทั้งสแตนชนิดนี้สามารถป้องกันการเกิดสิ่งสกปรกที่ปลายลวดได้ดี ทำให้เริ่มต้นการอาร์กได้ง่ายเหมาะกับงานที่ต้องการคุณภาพสูงให้การอาร์กสม่ำเสมอ เป็นลวดที่มีคุณภาพทั่วไปซึ่งจะดีกว่าอิเล็กโทรดทั้งสแตนบริสุทธิ์ แต่ด้อยกว่าลวดทอริเอตเต็ดทั้งสแตนในขณะทำการเชื่อม ถ้ามีสิ่งสกปรกติดอยู่ที่ปลายทั้งสแตนอิเล็กโทรด ความชื้น ออกซิเจนและไนโตรเจนจากภายนอก สามารถเข้ามาทำปฏิกิริยากับทั้งสแตนอิเล็กโทรดที่กำลังร้อน และถ้าในการเชื่อม ปลายทั้งสแตนอิเล็กโทรดสัมผัสกับชิ้นโลหะที่กำลังหลอมละลาย จะทำให้สิ่งสกปรกติดเข้าไปในเนื้อชิ้นงานได้ การทำความสะอาดปลายทั้งสแตนอิเล็กโทรดโดยการขัดด้วยหินเจียรระแนยหรือล่อทราย ตามวิธีที่แสดงในรูป 2.11 และ รูป 2.12 หรือการปรับกระแสไฟเชื่อมให้สูงแล้วทำการอาร์กทั้งสแตนอิเล็กโทรดส่วนที่สกปรกลงบนเศษโลหะที่สะอาดจนปลายทั้งสแตนอิเล็กโทรดนั้นโตขึ้น หลังจากนั้นนำส่วนปลายที่โตขึ้นไปหักออกแต่ถ้าสกปรกบ่อยๆ ควรจะเปลี่ยนใช้อันใหม่และหาสาเหตุที่เกิดสกปรกบ่อย

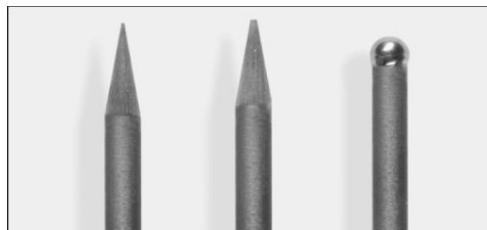


รูปที่ 2.11 แสดงแนวเส้นการแต่งปลายทั้งสแตนที่ถูกต้องสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม [2]



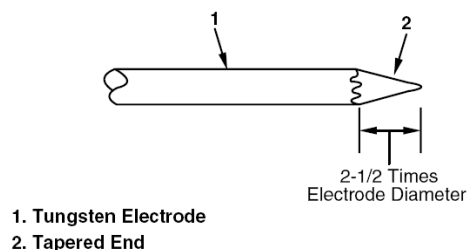
รูปที่ 2.12 แสดงแนวเส้นการแต่งปลายทั้งสแตนที่ผิดสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม [2]

ในการประกอบทังสเตนอิเล็กโทรดเข้ากับหัวเชื่อม จะต้องแต่งส่วนปลายให้เหมาะสมกับกระแสไฟที่เชื่อมเสียก่อน ถ้าใช้กระแสไฟตรงขั้วตรง (D.C.S.P.) เช่น การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมควรเจียรนัยส่วนปลายของทังสเตนอิเล็กโทรดด้านที่เชื่อมให้เรียว เป็นมุม 30 องศา และมนปลายส่วนที่แหลมเล็กน้อย ถ้าใช้ไฟกระแสสลับความถี่สูง (A.C.H.F.) ปลายทังสเตนก็จะเป็นรูปเรียวแต่จะมนกลมที่ส่วนปลายแหลม ให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 3 ใน 4 ของขนาดทังสเตน และกระแสตรงกลับขั้ว (D.C.R.P.) ปลายทังสเตนอิเล็กโทรดควรมีลักษณะมนกลม



รูปที่ 2.13 แสดงปลายที่เจียรนัยแล้วของทังสเตนอิเล็กโทรดในการเชื่อมแต่ละแบบ [2]

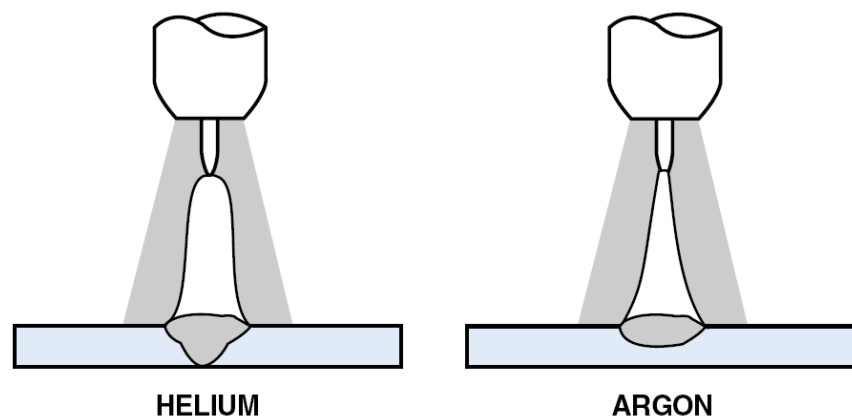
นอกจากนี้แล้วการปรับความยาวของปลายทังสเตนอิเล็กโทรดที่เป็นมุมแหลม ก็ขึ้นกับขนาดของทังสเตน และท่าเชื่อม โดยปกติจะมีความยาวอยู่ที่ 0.5-1 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง ดังภาพด้านล่าง



รูปที่ 2.14 แสดงปลายที่เจียรนัยแล้วของทังสเตนอิเล็กโทรดในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม [2]

4. แก๊สปกคลุม (Shielding Gas) หรือแก๊สเฉื่อย (Inert Gas) แก๊สปกคลุมในการเชื่อมแบบ TIG หมายถึง แก๊สที่นำมาใช้ปกคลุมบริเวณอาร์กเพื่อป้องกันมิให้อากาศโดยรอบเข้ามาทำปฏิกิริยากับการอาร์กและบ่อหลอมละลายในแนวเชื่อมเป็นวิธีการที่ใช้กันมานานแล้ว แต่แก๊สที่ใช้ปกคลุมไม่ได้บรรจุไว้ในท่อแบบเดียวกับการเชื่อมแบบ TIG เช่นการเชื่อมด้วยแก๊สออกซิ-อะเซติลีน การเผาไหม้ของแก๊สอะเซติลีนกับแก๊สออกซิเจนที่ทำให้เกิดความร้อนในการเชื่อม มีผลให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ซึ่งแก๊สเหล่านี้ จะทำหน้าที่เป็นแก๊สปกคลุม น้ำโลหะที่กำลังหลอมละลายในแนวเชื่อมได้ดี หรือการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ ก็เช่นเดียวกัน ความร้อนจากการอาร์กจะเผาไหม้ให้สารพอกหุ้ม หรือฟลักซ์ส่วนหนึ่งเปลี่ยนสภาพเป็นแก๊สปกคลุมบริเวณอาร์กและทำหน้าที่ให้การอาร์กสม่ำเสมออีกด้วย

การเชื่อมแบบ TIG โดยทั่วไปแก๊สที่ใช้คือ อาร์กอนและฮีเลียม ซึ่งแก๊สทั้งสองจะต้องมีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 99.99 จึงจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเลือกใช้แก๊สชนิดใดจะต้องพิจารณาศึกษาคุณสมบัติของแก๊สแต่ละชนิดก่อน แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สที่นิยมใช้กันมากโดยเฉพาะเป็นแก๊สที่มีน้ำหนักมากกว่าแก๊สปกคลุมชนิดอื่น นหนักกว่าอากาศประมาณ 1.4 เท่า และหนักกว่าแก๊สฮีเลียมถึง 10 เท่า การนำไปใช้งานจึงต้องให้อัตราการไหลของแก๊สฮีเลียมมากกว่าแก๊สอาร์กอน ประมาณ 2 ถึง 3 เท่า เพราะแก๊สฮีเลียมจะเบาดูออกจากบริเวณการอาร์กอย่างรวดเร็วกว่า ดังแสดงในรูป 2.15



รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบความแตกต่างของลักษณะแนวเชื่อมเมื่อใช้แก๊สอาร์กอน และฮีเลียมปกคลุม [2]

แก๊สเฉื่อยที่ใช้ในการเชื่อม TIG ได้แก่ อาร์กอน (Ar) ฮีเลียม (He) และไฮโดรเจน (H) หรือผสมระหว่างแก๊สดังกล่าว แต่ส่วนใหญ่แล้วจะใช้แก๊สอาร์กอน เพราะหาได้ง่าย ราคาพอสมควรมีน้ำหนักมากกว่าฮีเลียม ซึ่งจะให้ผลดีในการเชื่อมเนื่องจากอัตราการไหลต่ำ แก๊สอาร์กอนจะมีความต้านทานต่อการอาร์กน้อยกว่าแก๊สฮีเลียม ถ้าหากกระแсарอาร์กมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยก็จะไม่ทำให้ให้การ

อาร์กขาดตอน แต่จะต้องเป็นแก๊สอาร์กอนที่มีความบริสุทธิ์ 99.8% สำหรับแก๊สฮีเลียมก็มีข้อดีคือ การเชื่อมจะกินลึกกว่าและทำการเชื่อมได้รวดเร็วกว่าแก๊สอาร์กอน แต่แก๊สฮีเลียมจะต้องมีความบริสุทธิ์ถึง 99.99% ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) นั้น เหมาะสำหรับใช้กับเครื่องแบบอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติ เพราะแก๊สนี้ทำให้ระยะการอาร์กเปลี่ยนแปลงได้ง่ายต่อการควบคุม รายละเอียดการใช้งานแก๊สทั้งสองมีดังนี้ [2]

1. แก๊สอาร์กอน (Argon) เป็นแก๊สเฉื่อย การนำแก๊สอาร์กอนมาใช้เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตแก๊สออกซิเจน ซึ่งในอากาศทั่วไปมีปริมาณแก๊สอาร์กอนผสมอยู่เพียงร้อยละ 0.94 ทำให้ราคาของแก๊สอาร์กอนสูงกว่าแก๊สออกซิเจนหลายเท่าตัว การจัดเก็บแก๊สอาร์กอนบรรจุไว้ในสถานะของแก๊สหรือของเหลวก็ได้ โดยรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในระดับต่ำกว่า -300°F หรือ -184°C แก๊สอาร์กอนที่บรรจุอยู่ในสถานะแก๊สจะอัดไว้ด้วยความดันประมาณ 3,000 ปอนด์ต่อตารางฟุต ที่อุณหภูมิ 70°F และมีความจุประมาณ 330 ลูกบาศก์ฟุต ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สามารถแยกอิเล็กตรอนจากอะตอมของแก๊สอาร์กอน (Ionization Potential) คือ 15.7 โวลต์ และแก๊สอาร์กอนมีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อน จึงทำให้บริเวณการอาร์กมีความเข้มข้นสูง ลำแสงการอาร์กจะมีลักษณะเล็กและแคบ ดังรูป 2.15 ใช้ได้ดีกับการเชื่อมโลหะอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมด้วยกระแสไฟสลับ แก๊สอาร์กอนทำให้การอาร์กอนทำให้การอาร์กสม่ำเสมอ แนวเชื่อมสะอาด เหมาะกับการเชื่อมด้วยโลหะเกือบทุกชนิดที่เป็นโลหะขึ้นงานบาง ซึ่งมีความหนาไม่เกิน $1/8$ นิ้ว

2. แก๊สฮีเลียม (Helium) เป็นแก๊สชนิดหนึ่งที่มีอยู่ในอากาศร้อยละ 0.0005 โดยปริมาตรมีน้ำหนักเบามาก โดยเบากว่าแก๊สอาร์กอนถึง 10 เท่า เมื่อนำไปใช้ในการปกคลุมการอาร์กจะต้องเพิ่มอัตราการไหลให้สูงกว่าแก๊สอาร์กอนประมาณ 2 ถึง 3 เท่า จึงจะมีประสิทธิภาพในการปกคลุมเท่าแก๊สอาร์กอน ส่วนราคาของแก๊สฮีเลียมกับแก๊สอาร์กอนจะใกล้เคียงกัน ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สามารถแยกอิเล็กตรอนจากอะตอมของแก๊สฮีเลียมได้คือ 24.3 โวลต์ ซึ่งสูงกว่าแก๊สอาร์กอนมาก เนื่องจากแก๊สฮีเลียมมีคุณสมบัติเป็นตัวนำความร้อนที่ดี เมื่อนำไปใช้งานเชื่อมเปลวอาร์กจะแผ่กระจายกว้าง ความเข้มข้นการอาร์กลดลง ความร้อนบริเวณแนวเชื่อมจะมีเนื้อที่กว้างขึ้น และความร้อนในศูนย์กลางของการอาร์ก ซึ่งมีความเข้มข้นสูงจะหลอมละลายชิ้นงานตรงแนวเชื่อมให้เกิดการซึมลึกเข้าไปในเนื้อโลหะได้ดี และซึมลึกกว่าการใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สปกคลุม ดังแสดงในภาพ 2-15 เมื่อใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สปกคลุมในงานเชื่อม จะให้พลังงานความร้อนสูง จึงเหมาะกับการเชื่อมชิ้นงานหนาและชิ้นงานที่ต้องการความเร็วในการเชื่อมสูง แต่อาร์กโวลเตจและพลังงานความร้อนไม่คงที่ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดรูพรุนในแนวเชื่อมได้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานเชื่อมธรรมดาที่ควบคุมด้วยมือ แต่จะเหมาะกับการเชื่อมแบบอัตโนมัติมากกว่า และเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในงานเชื่อม ลดการเกิดรูพรุนในแนวเชื่อม ควรใช้แก๊สฮีเลียมผสมกับแก๊สอาร์กอนในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 จะทำให้ได้แนวเชื่อมที่ดีและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นการพิจารณาเลือกใช้แก๊สปกคลุมให้เหมาะสมกับงานเชื่อมสามารถใช้ข้อมูลในตารางที่ 2.2 เป็นเกณฑ์ตัดสินใจได้หัวปรับความดันละวัดปริมาณการไหลของ

แก๊ส (Regulator with Flow Meter) แก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อมแบบ TIG ถูกบรรจุไว้ในท่อความดันสูง ดังนั้นการจะนำมาใช้งานจะต้องมีอุปกรณ์ปรับความดันหรือหัวปรับความดัน (Regulator) เพื่อลดความดันมาใช้ตามความเหมาะสม ซึ่งหัวปรับความดันแก๊สปกคลุมจะออกแบบเป็นลักษณะพิเศษคือจะมีอุปกรณ์วัดความดันภายในท่อ มีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว (PSI) และมี Flow Meter วัดปริมาณการไหลของแก๊ส มีหน่วยเป็นลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง (CFH) หรือลิตรต่อนาที (LPM)

ตารางที่ 2.2 การเลือกใช้แก๊สปกคลุม [2]

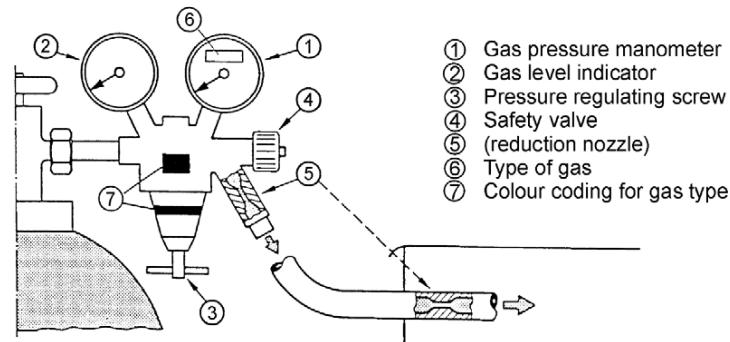
โลหะเชื่อม	วิธีเชื่อม	แก๊สปกคลุม	ผลที่ได้รับ
อะลูมิเนียม	บังคับด้วยมือ กึ่งอัตโนมัติ	อาร์กอน ฮีเลียม อาร์กอน + ฮีเลียม	1. เริ่มต้นการอาร์ก คุณภาพแนวเชื่อมและ ปฏิกิริยาทำความสะอาดดีสิ้นเปลืองแก๊สน้อย2. เชื่อมด้วยความเร็วสูง3. คุณภาพแนวเชื่อมดีขึ้น กว่าการใช้ฮีเลียมอย่างเดียวปริมาณแก๊สใช้น้อย
แมกนีเซียม	0-1/16 นิ้ว 0-1/16 นิ้ว	ฮีเลียม อาร์กอน	1. การซึมลึกดี 2. แนวเชื่อมสะอาดดีมากใช้ปริมาณแก๊สน้อย
เหล็กกล้า ละมุน	บังคับด้วยมือ 0-1/8 นิ้ว เชื่อมจุด กึ่งอัตโนมัติ	อาร์กอน อาร์กอน + ฮีเลียม ฮีเลียม	1. เชื่อมได้ง่ายโดยเฉพาะเชื่อมในตำแหน่งทำ ต่างๆ 2. เชื่อมโลหะชิ้นงานหนา ให้ผลการซึมลึกดี เริ่มต้นเชื่อมง่าย 3. การซึมลึกดี เชื่อมได้ด้วยความเร็วสูง
โครเมียม นิกเกิล	บังคับด้วยมือ	อาร์กอน อาร์กอน + ฮีเลียม	1. เชื่อมโลหะแผ่นบางได้ดี 2. เชื่อมโลหะแผ่นหนาได้ดี ให้ความร้อน และ ความเร็วในการเชื่อมสูงขึ้น
เหล็กกล้าไร้ สนิม	กึ่งอัตโนมัติ	อาร์กอน + ไฮโดรเจน (64%+35%) ฮีเลียม	1. ใช้กระแสต่ำ ปริมาณการไหลของแก๊สน้อย รูปร่างแนวเชื่อมดี และป้องกันการเกิดรอยแห้ว ที่ขอบแนวเชื่อม 2. ให้ความร้อนสูงสุด และให้การซึมลึกสูงมาก

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) การเลือกใช้แก๊สปกคลุม [2]

โลหะเชื่อม	วิธีเชื่อม	แก๊สปกคลุม	ผลที่ได้รับ
ทองแดง ทองแดงผสม นิกเกิลผสม		อาร์กอน อาร์กอน + ฮีเลียม ฮีเลียม	1. เหมาะกับโลหะบาง ควบคุมบ่อหลอมละลาย ได้ง่ายรูปร่างแนวเชื่อมและการซึมลึกดี 2. ให้ความร้อนสูงในโลหะชิ้นงานหนาที่มีคุณสมบัตินำความร้อนได้ดี 3. ในชิ้นงานโลหะหนาจะให้ความร้อนสูงมาก ในขณะทำการเชื่อมด้วยความเร็วสูง
ไททาเนียม		อาร์กอน ฮีเลียม	1. อัตราการไหลของแก๊สดำ การอาร์กสม่ำเสมอ และการควบคุมบ่อหลอมละลาย ได้ง่าย 2. ให้การซึมลึกดีในโลหะชิ้นงานหนาสำหรับการเชื่อมที่บังคับด้วยมือ แต่ต้องมีแก๊สปกคลุม ด้านหลัง เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศโดยรอบมารวมตัวกับโลหะขณะทำการเชื่อม

5. อุปกรณ์ปรับความดันแก๊ส (Regulator) หัวปรับความดันละวัดปริมาณการไหลของแก๊ส (Regulator with Flow Meter) แก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อมแบบ TIG ถูกบรรจุไว้ในท่อความดันสูง ดังนั้นการจะนำมาใช้งานจะต้องมีอุปกรณ์ปรับความดันหรือหัวปรับความดัน (Regulator) เพื่อลดความดันมาใช้ตามความเหมาะสม ซึ่งหัวปรับความดันแก๊สปกคลุมจะออกแบบเป็นลักษณะพิเศษคือ จะมีอุปกรณ์วัดความดันภายในท่อ มีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว (PSI) และมี Flow meter วัดปริมาณการไหลของแก๊ส มีหน่วยเป็นลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง (CFH) หรือลิตรต่อนาที (LPM) ซึ่งในงานเชื่อมแบบอาร์กทั้งสแตนเลสโดยใช้แก๊สคลุมปริมาณแก๊สที่ใช้ในแต่ละลักษณะงานจะมีปริมาณที่ไม่เท่ากัน จึงจำเป็นต้องปรับปริมาณแก๊สตามต้องการในแต่ละลักษณะงาน ซึ่งมีด้วยกันสองแบบ แบบแรกคือ แบบ Manometer แบบที่สองคือแบบ Flow-Meter แบบ Manometer รายละเอียดแสดงตามรูป 2.16 และแบบ Flow-Meter ตามรูป 2.17

1. แบบ Manometer



รูปที่ 2.16 อุปกรณ์ปรับความดัน แบบ Manometer [2]

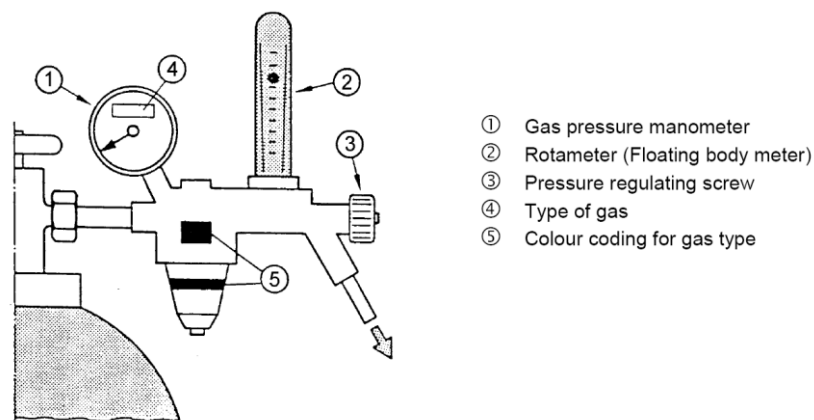
หลักการทำงานของอุปกรณ์ปรับความดันแบบ Manometer จากรูปจะปรากฏอุปกรณ์ย่อยแต่ละตัว ซึ่งมีหน้าที่ต่างกัน

- หมายเลข 1 Gas Pressure Manometer มีหน้าที่วัดแรงดันที่ใช้งาน
- หมายเลข 2 Gas Level Indicator เป็นเกจวัดแรงดันสูง
- หมายเลข 3 Pressure Regulating Screw ทำหน้าที่เป็นวาล์วเปิดปิดแก๊สจากตำแหน่ง

หมายเลข 2 ไปยังหมายเลข 1

- หมายเลข 4 Safety Valve ทำหน้าที่เป็นวาล์วจ่ายปริมาณแก๊สที่ต้องการเมื่อทำการเปิดวาล์ว ปริมาณแก๊สจะไหลไปยังหัวเชื่อม (Torch) โดยเกจหมายเลข 2 จะทำหน้าที่วัดปริมาณที่นำไปใช้
- หมายเลข 5 Reduction Nozzle ทำหน้าที่ค่อยๆ ปล่อยแก๊สที่นำไปใช้งาน
- หมายเลข 6 Type of Gas บอกชนิดของแก๊สที่ใช้
- หมายเลข 7 Color Coding for Gas Type รหัสแถบสีบอกชนิดของแก๊ส

2. แบบ Flow-Meter



รูปที่ 2.17 อุปกรณ์ปรับความดัน แบบ Flow-Meter [2]

หลักการทำงานของอุปกรณ์ปรับความดันแบบ Flow-Meter จากรูปจะปรากฏอุปกรณ์ย่อย แต่ละตัว ซึ่งมีหน้าที่ต่างกัน

- หมายเลข 1 Gas pressure Manometer เป็นเกจวัดแรงดันสูง
- หมายเลข 2 Rota-meter (Floating Body Meter) หลอดแก้วและลูกลอยวัดปริมาณแก๊สที่ใช้งาน
- หมายเลข 3 Pressure Regulating Screw ทำหน้าที่เป็นวาล์วเปิดปิดแก๊สหรือเพิ่มลดปริมาณแก๊สที่ต้องการ
- หมายเลข 4 Type of Gas บอกชนิดของแก๊สที่ใช้
- หมายเลข 5 Color Coding for Gas Type รหัสแถบสีบอกชนิดของแก๊ส

2.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมแบบ TIG

Mannion and HeinzmanIII (1999) กล่าวว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมแบบ TIG ดังนี้ [5]

2.2.1 ระยะอาร์ก (Arc Length หรือ Arc Gap)

คือ ระยะจากหัวอิเล็กโทรดถึงพื้นผิวใช้งาน การตั้งค่าระยะอาร์กขึ้นอยู่กับกระแสไฟเชื่อม, ความเสถียรของการเกิดอาร์ก ดังนั้นการรักษาระยะอาร์กให้คงที่ มีผลอย่างยิ่งต่อความต่อเนื่องของรอยเชื่อม จากกฎของทอมป์ (Rule of Thumb) ระยะอาร์กที่ใช้งานเท่ากับระยะอาร์กพื้นฐานเท่ากับ 0.10 นิ้ว รวมกับครึ่งหนึ่งของความลึกของรอยเชื่อมที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น ความหนาของแผ่นโลหะ 0.30 นิ้ว เท่ากับระยะความลึกของรอยเชื่อมเท่ากับ 0.30 นิ้ว ดังนั้น

$$\begin{aligned}\text{ระยะอาร์ก} &= \text{ระยะอาร์กพื้นฐาน (0.10 นิ้ว)} + \text{ระยะความลึกของรอยเชื่อม (0.30/2 นิ้ว)} \\ &= 0.25 \text{ นิ้ว}\end{aligned}$$

2.2.2 ความเร็วในการเชื่อม (Weld Speed)

คือ ความเร็วของหัวเชื่อมขณะเคลื่อนที่เชื่อมเหนือชิ้นงาน ขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนลวดเติมและความหนาชิ้นงาน จุดประสงค์หลักของการเชื่อม คือใช้เวลาน้อยที่สุดโดยแนวเชื่อมมีคุณภาพตามต้องการ ความเร็วในการเชื่อมเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดอัตราการผลิตที่ได้จากการเชื่อม ยกตัวอย่างเช่น งานเชื่อมรูปวงกลมมีอัตราความเร็วในการเชื่อม 4-10 นิ้วต่อนาที (IPM) งานเชื่อมเครื่องกลึงมีอัตราความเร็วในการเชื่อม 5-60 นิ้วต่อนาที และงานเชื่อมหม้อต้มมีอัตราความเร็วในการเชื่อมเริ่มจาก 3 นิ้วต่อนาที จนถึง 60 ฟุตต่อนาที (FPM) งานเชื่อมท่อขณะหมุนใช้อัตราความเร็วในการเชื่อมเริ่มต้น 10

นิ้วต่อนาที ถึง 20 นิ้วต่อนาที โดยปกติแล้วงานเชื่อมวัสดุที่มีความหนามาก (Heavy-Wall Thickness) ใช้ความเร็วในการเชื่อม ต่ำกว่างานเชื่อมวัสดุที่มีความหนาน้อย (Thinner-Well Thickness)

2.2.3 กระแสไฟเชื่อม (Welding Current)

คือ กระแสไฟที่ทำให้เกิดความร้อนที่หัวอิเล็กโทรดเกิดจากถ่ายเทพลังงานจากหัวอิเล็กโทรดไปยังชิ้นงาน การปรับตั้งกระแสไฟเชื่อมขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุที่ถูกเชื่อม, ความหนาชิ้นงาน และก๊าซปกคลุมวัตถุประสงค์หลักของการปรับตั้งกระแสไฟเชื่อมเพื่อให้ไม่มีรอยตำหนิบนรอยเชื่อมและความลึกของรอยเชื่อมตามต้องการขณะเริ่มต้นการเชื่อม ควรปรับตั้งกระแสที่ 1 แอมป์ สำหรับความหนาชิ้นงานทุกๆ 0.001 นิ้ว และใช้อัตราความเร็วเพิ่มขึ้น 10 นิ้วต่อนาที สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม ยกตัวอย่าง ความหนาชิ้นงาน 0.030 นิ้ว กระแสไฟเฉลี่ยเท่ากับ 0.030/0.001 เท่ากับ 30 แอมป์

2.3 เหล็กกล้าคาร์บอน

เหล็กกล้าถูกจำแนกตามปริมาณคาร์บอนออกเป็น

2.3.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel)

มีคาร์บอนน้อยกว่าร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก เป็นเหล็กกล้าที่มีการผลิตและการใช้งานมากที่สุดในบรรดาเหล็กกล้าด้วยกันโดยมีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ไม่สามารถอบชุบเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีทางความร้อนได้ (ไม่สามารถได้โครงสร้าง martensite ได้โดยการ quenching) การเพิ่มความแข็งแรงให้กะบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำใช้วิธี cold working โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำประกอบไปด้วย ferrite และ pearlite เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีความเหนียวและอ่อนมาก ทำให้ขึ้นรูปด้วยวิธีทางกลและการเชื่อมได้ง่ายและต้นทุนต่ำ

2.3.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel)

มีคาร์บอนระหว่างร้อยละ 0.25- 0.6 โดยน้ำหนัก เหล็กกล้าประเภทนี้สามารถอบชุบด้วยกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ (quench and tempering) Plain medium carbon steel มีความสามารถในการอบชุบน้อยได้น้อยจึงมีการเติมธาตุผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการอบชุบ เช่น Cr, Ni, Mo Alloyed medium carbon steel มีความแข็งแรงสูงกว่า plain low carbon steel แต่มีความเหนียวและขึ้นรูปยากกว่าเช่นกัน

2.3.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel)

โดยทั่วไปมีคาร์บอนระหว่างร้อยละ 0.6-2 โดยน้ำหนัก มีความแข็งแรงและแข็งมากที่สุดแต่มีความเหนียวน้อยที่สุดในบรรดาเหล็กกล้าคาร์บอน เกือบทั้งหมดถูกใช้งานในสภาพที่ผ่านการอบชุบสามารถทนการสึกหรอได้ดีใช้ทำเครื่องมือและแม่พิมพ์ ธาตุผสมทั่วไปได้แก่ Cr, Mo, V, W ธาตุเหล่านี้จะรวมตัวกับคาร์บอนให้สารประกอบ Carbide ที่มีความแข็งและจุดหลอมเหลวสูง

2.4 การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ

โลหะทุกชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เนื่องจากอิทธิพลของธาตุต่างๆ ที่ผสมอยู่ในโลหะแต่ละชนิดตลอดจนกระบวนการผลิต คุณสมบัติโดยธรรมชาติของโลหะนั้น และกรรมวิธีทางความร้อนที่กระทำต่อโลหะ ดังนั้น เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติบางอย่างของโลหะ การทดสอบและการตรวจสอบทางโลหะวิทยาจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ สามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือ การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macroscopic) และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscopic) การตรวจสอบโครงสร้างทั้ง 2 วิธีดังกล่าว ก็เพื่อต้องการทราบอิทธิพลของธาตุผสมในโลหะที่ทำการตรวจสอบนั้นๆ อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากกระทำทางความร้อนสิ้นสุดลงด้วย และข้อมูลที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องมือ เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม [5]

2.4.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

เป็นการตรวจสอบโครงสร้างด้วยตาเปล่าหรือใช้กล้องขยายที่มีกำลังขยายที่ไม่เกิน 50 เท่า การเตรียมชิ้นงานเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนั้นไม่ยุ่งยาก เพราะว่าเป็นการตรวจสอบรูปพรรณภายในของโลหะ การแยกชิ้นของผลึก รอยร้าว รอยแตกหน้าตัดที่ถูกดึงจนขาด และปริมาณธาตุผสมในโลหะ เป็นต้นการตรวจสอบด้วยวิธีนี้ จะมีวิธีการตรวจสอบอยู่หลายวิธีทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ และจุดประสงค์ของการตรวจสอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ [5]

2.4.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคโดยวิธี Baumann เป็นการตรวจสอบการแพร่กระจายของธาตุกัมมันต์ในโลหะว่ามีมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะใช้กับเหล็กกล้าเท่านั้น โดยวิธีการตรวจสอบ ดังนี้

1. ตัดชิ้นงานตามพื้นที่หน้าตัดที่ต้องการตรวจสอบ ด้วยเครื่องมือที่ทำให้เกิดความร้อนน้อยที่สุด ทั้งนี้เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ธาตุกัมมันต์มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลทำให้การตรวจสอบเกิดข้อผิดพลาดจากความเป็นจริง

2. ขัดผิวหน้าตัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 220-320 และในขณะที่ขัดผิวควรเปิดน้ำ เพื่อไล่ผงขัดและเศษโลหะออกด้วย

3. ล้างผิวขัดให้สะอาดปราศจากไขมัน
4. นำกระดาษอัดรูปถ่ายตอนกลางวันจุ่มในกรดกำมะถันเจือจาง ซึ่งประกอบด้วยกรดกำมะถัน
5. มิลลิเมตร ผสมกับน้ำกลั่น 100 มิลลิเมตร โดยจุ่มนานประมาณ 2 นาที
5. จากนั้นนำกระดาษอัดรูปออกจากกรดแล้วปล่อยให้แห้ง วางลงบนผิวขัดโดยใช้เวลาประมาณ 1-5 นาที
6. ล้างกระดาษอัดรูปด้วยน้ำเปล่า แล้วนำไปแช่ในน้ำยาคงตัว ซึ่งประกอบด้วยน้ำ 1 ลิตร เกลือ 250 กรัม โดยใช้เวลาในการแช่ประมาณ 15 นาที
7. จากนั้นนำกระดาษอัดรูปดังกล่าวไปแช่น้ำเปล่านาน 30 นาที แล้วเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน เมื่อเป่าด้วยลมร้อนแล้วจนกระดาษอัดรูปแห้งแล้ว เราจะเห็นภาพการกระจายตัวของกำมะถันเป็นสีน้ำตาลแก่ปรากฏอยู่บนกระดาษอัดรูปนั้น

2.4.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคโดยวิธี Fly Etching เหมาะสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ หรือเหล็กกล้าที่ผ่านการอบปกติมาแล้ว การตรวจสอบวิธีนี้จะใช้สำหรับการตรวจหาแนวเส้นใยการร้าวหรือแนวใยรับแรง ซึ่งเกิดจากการขึ้นรูปเย็น และกรรมวิธีทางความร้อน และมีผลต่อความแข็งแรงของโลหะนั้นๆ โดยมีวิธีการตรวจสอบ ดังนี้

1. ขัดผิวหน้าชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600-1000
2. นำชิ้นตรวจสอบไปอบกึ่งตัวที่อุณหภูมิ 150-200 เซลเซียส
3. กัดผิวที่ต้องการตรวจสอบด้วยกรดดินประสิวแบบเจือจางโดยใช้เวลาในการกัด 1-2 นาที
4. เมื่อกัดด้วยกรดตามเวลาที่กำหนดแล้ว ล้างผิวทดสอบด้วยแอลกอฮอล์แล้วเป่าให้แห้ง
5. ตรวจสอบความเข้มของผิว ถ้าผิวตรวจสอบช่วงใดได้รับอิทธิพลจากการขึ้นรูปเย็น หรือกรรมวิธีทางความร้อน จนเกิดเส้นใยการร้าวและเส้นใยรับแรง ผิวช่วงนั้นจะถูกกัดด้วยกรดเป็นสีเข้มกว่าบริเวณอื่น

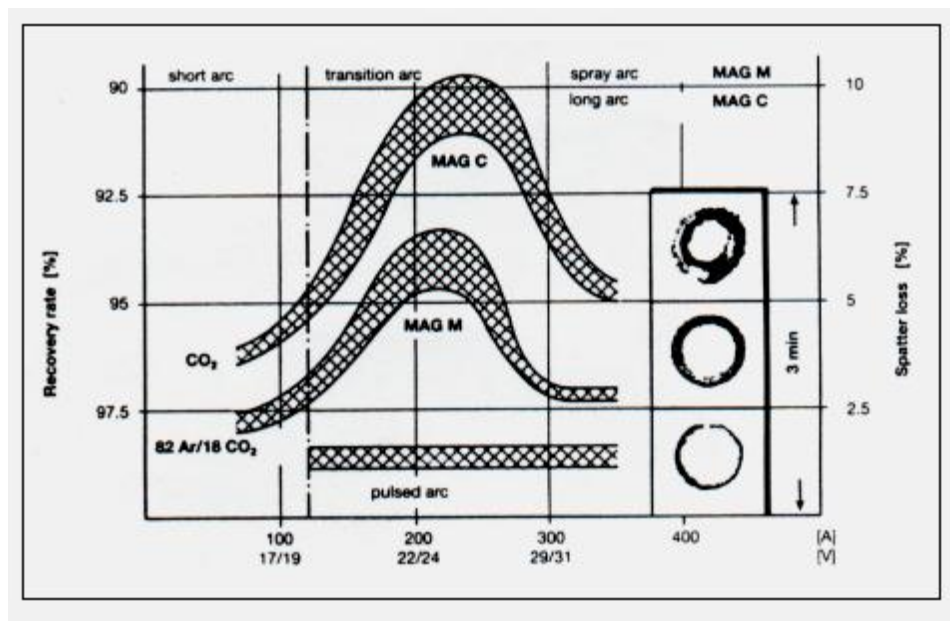
2.4.1.3 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคโดยวิธี Grain Flow เป็นการตรวจสอบเหล็กกล้าที่ผ่านการตีขึ้นรูป ซึ่งจะทำให้เกรนของเหล็กเกิดการไหลเลื่อนไปตามแนวแรงที่ดี เกรนที่ดีจะต้องมีการไหลของเกรนอย่างต่อเนื่องตามรูปร่างลักษณะของชิ้นงานนั้นๆ ซึ่งจะส่งผลให้ชิ้นงานนั้นมีความแข็งแรงสูง โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

1. ตัดชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบด้วยเครื่องมือตัดที่ไม่ก่อให้เกิดความร้อนสูง ทั้งนี้เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ธาตุกำมะถันมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลทำให้การตรวจสอบเกิดข้อผิดพลาดจากความเป็นจริง
2. ขัดผิวหน้าชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180-320
3. นำกรดเกลือ 2 ส่วน ผสมกับน้ำ 3 ส่วน แล้วนำไปต้มให้เดือด

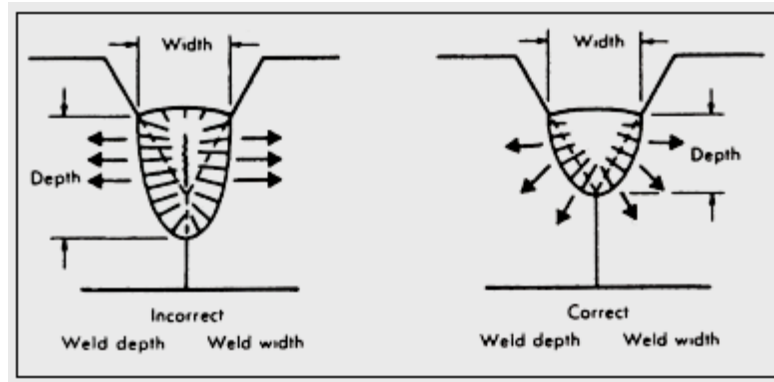
4. จุ่มชิ้นงานลงในกรดเกลือที่กำลังเดือดนานไม่เกิน 20 นาที แล้วนำชิ้นงานออกจากกรดเกลือ จากนั้นเราจะสามารถมองเห็นแนวการไหลของเกรนได้ชัดเจน

2.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค รูปร่างแนวเชื่อม [6]

การศึกษาโครงสร้างมหการูปร่างแนวเชื่อม สำหรับการเชื่อมชิ้นงาน โดยกระบวนการเชื่อม GTAW จากการศึกษาโครงสร้างมหภาคในส่วนของการหลอมลึกของแนวเชื่อม โดยทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างความลึกต่อความกว้างของรูปร่างแนวเชื่อม ที่มีผลจากอิทธิพลของความกว้าง ตามมาตรฐาน ASTM E381 และใช้กรดในการกัดโครงสร้างที่แตกต่างจากมาตรฐาน ASTM E340 เพราะว่าการให้โครงสร้างแนวเชื่อมมีความแตกต่างกับโครงสร้างชิ้นงานที่ชัดเจนของการถ่ายภาพด้วยเครื่องสแกน จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนระหว่างความลึกต่อความกว้าง มีผลต่อสมบัติทางการใช้งานตามการออกแบบทางวิศวกรรมการเชื่อมพบว่าอัตราส่วนระหว่างความลึกต่อความกว้างควรมีค่าเท่ากับ 1 ถึง 1.4 ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่ามากกว่า 1.5 มีโอกาสเกิดการแตกร้าวได้ ส่งผลต่อสมบัติทางกลและการใช้งาน แสดงในรูปที่ 2.18 [6]



รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ชนิดของแก๊สต่อกระแสเชื่อมและเปอร์เซ็นต์ของเม็ดโลหะ และประสิทธิภาพของการหลอมลวดเชื่อม [6]



รูปที่ 2.19 อัตราส่วนระหว่างความลึกต่อความกว้างของแนวเชื่อม [6]

2.4.3 การหาอัตราการหลอมละลาย

การคิดอัตราการหลอมละลายในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมกับระยะยื่นของลวดเชื่อม 10,15,20,25,30,35 มม. ที่มีผลต่ออัตราการหลอมละลายในช่วงแต่ละช่วงนั้นจะใช้สูตรการคำนวณตาม โดยใช้สูตรดังนี้ [7]

$$MR = aI + bLI^2$$

สมการที่ 2.1

MR = อัตราการหลอมอิเล็กโตรด (gram/min)

a = สัดส่วนคงที่สำหรับความร้อนที่ขั้วบวกและขั้วลบ ขนาดขึ้นอยู่กับกระแสเชื่อม สารประกอบและกระแสไฟฟ้าตรงของอิเล็กโตรดลบ และการแผ่ของ ของอิเล็กโตรดบวก gram/min.A

b = สัดส่วนคงที่สำหรับความร้อนจากความต้านทานกระแสเชื่อม และประกอบด้วยพิกัดความต้านทานของอิเล็กโตรด gram/min.A².mm

L = ระยะยื่นของลวดเชื่อม (mm)

I = กระแสเชื่อม (A)

2.4.4 การหาขนาดพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อมต่ออัตราการหลอมละลาย

$$Area = \frac{MR}{\rho \times V} \times 100$$

สมการที่ 2.2

- A = ขนาดพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม (ตารางมิลลิเมตร)
 MR = อัตราการหลอมละลายของอิเล็กโตรด (gram/min)
 ρ = ความหนาแน่นของโลหะลวดเชื่อม (กรัม/ลบ.ซม.)
 V = ความเร็วของการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม cm/min

2.4.5 การหาการหลอมลึก

การคิดการหลอมลึกในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อม ความเร็วในการเชื่อมกับระยะยื่นลวดเชื่อม 10, 15, 20, 25, 30, มม. ที่มีผลต่อการหลอมลึกในช่วงกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงนั้นจะใช้สูตรการคำนวณตามมาตรฐาน AWS. ซึ่งอ้างอิงการคำนวณจาก JACKSON [8] โดยใช้สูตรเดียวกันกับมาตรฐาน AWS.

$$P = k \times \sqrt[3]{\frac{I^4}{V \times E^2}}$$

สมการที่ 2.3

- P = ค่าการหลอมลึก(มิลลิเมตร)
 I = กระแสเชื่อม(แอมป์แปร์)
 V = ความเร็วในการเชื่อม(มิลลิเมตร/นาที)
 E = แรงเคลื่อนกระแสไฟฟ้าเชื่อม(โวลท์)
 k = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับกระบวนการเชื่อม

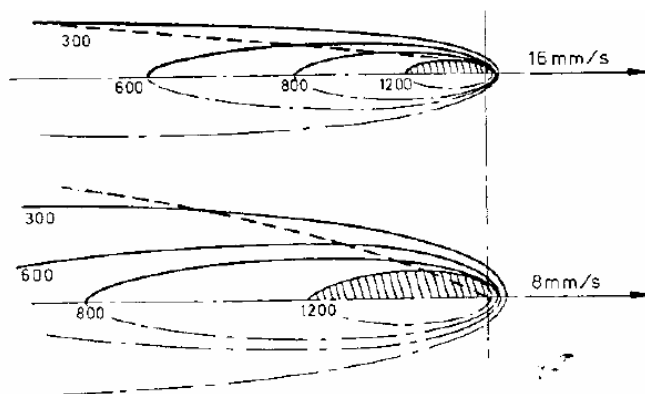
การหาค่าการหลอมลึกที่ได้โดยการวัดค่าการหลอมลึกตามมาตรฐาน AWS หาได้โดยการวัดค่าอัตราการหลอมลึกของการเชื่อมนี้จากการวัดค่าการหลอมลึกโดยใช้โปรแกรม AutoCAD นั้นทำให้เห็นถึงความแตกต่างของการเชื่อมในกระแสเชื่อมเดียวกัน และแรงดันกระแสต่างกัน ระยะยื่นของลวดเชื่อม ต่างกันที่ระยะ 10, 15, 20, 25, 30 มม. ในการวัดการหลอมลึกตามมาตรฐาน AWS. จะวัดตามรูปที่ 2.20



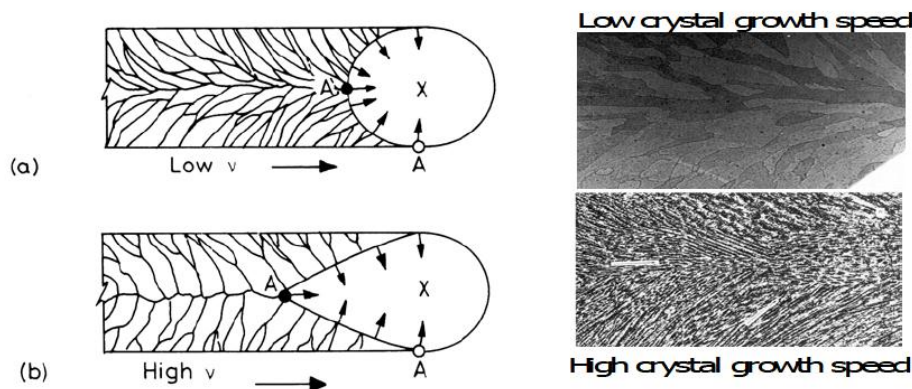
รูปที่ 2.20 การหาอัตราการหลอมลึกตามมาตรฐาน AWS[9]

2.5 อิทธิพลของกระแสเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม

ความเร็วในการเดินลวดเชื่อมจะมีผลต่อลักษณะรูปร่างของวงจรระแสความร้อน ก็จะส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อมด้วย กล่าวคือจะทำให้แนวเชื่อมเล็กหรือใหญ่ตามต้องการ การที่ได้แนวเชื่อมที่มีขนาดต่างกันการหลอมละลายของงานเชื่อมก็จะต่างกันออกไป ถ้าเพิ่มความเร็วในการเชื่อม จะมีผลดังนี้ 1) ทำให้รูปร่างของวงจรพลังงานความร้อนต่อความยาวของแนวเชื่อมลดลง 2) การหลอมละลายของงานเชื่อมจะลดลง 3) การสิ้นเปลืองลวดเชื่อม ฟลักซ์ ต่อความยาวแนวเชื่อมลดลง ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการรับภาระของแนวเชื่อมลดลงไปด้วย [10]



รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะการแผ่กระจายของวงจรความร้อนเมื่อความเร็วในการเชื่อมต่างกัน



รูปที่ 2.22 แสดงการเกิดโครงสร้างของรอยเชื่อมกรณีใช้ความเร็วต่างกัน

การใช้ความเร็วสูงหรือความเร็วต่ำในการเชื่อมจะส่งผลโดยตรงต่อลักษณะของการเกิดโครงสร้างของรอยเชื่อม กล่าวคือถ้าเป็นการเชื่อมด้วยความเร็วสูง ๆ รอยเชื่อมจะเกิดโครงสร้าง Columnar Dendrite ที่เล็กและละเอียด ซึ่งจะส่งผลดีต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อม แต่ถ้าเชื่อมด้วยความเร็วต่ำ ๆ ในเวลาที่

เท่ากันโลหะงานจะได้รับพลังงานความร้อนเข้ามากกว่า และเย็นตัวช้ากว่าก็จะเกิดการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์เกิดขึ้นได้ และโครงสร้างของ Columnar Dendrite ที่ได้จะหยาบกว่าซึ่งไม่ส่งผลดีต่อสมบัติทางกลเลย [11]

2.6 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าคาร์บอนต่อความสามารถในการเชื่อม

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเป็นเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนประมาณอยู่ 0.3-0.7% มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าชนิดนี้สามารถนำไปชุบแข็งได้ ถ้ามีคาร์บอน 0.5% ขึ้นไป ถ้ามีคาร์บอนต่ำกว่า 0.5% ชุบแข็งได้เฉพาะที่ผิวชิ้นงานเหล็กกล้าชนิดนี้ใช้ทำรางรถไฟ เพลาเครื่องจักรกล, เฟือง, หัวค้อน หรือชิ้นงานที่ต้องการความแข็งแรงแต่มีความแข็งพอสมควร เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 0.2-0.5% มีความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่จะมีความเหนียวน้อยกว่า สามารถนำไปชุบแข็งได้ เหมาะกับงานทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกลรางรถไฟ เฟือง ก้านสูบ ท่อเหล็ก ไขควง เป็นต้น เหล็กกล้าคาร์บอนสูงเป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 0.5-1.5% มีความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงสูง เมื่อชุบแข็งแล้วจะเปราะเหมาะสำหรับงานที่ทนต่อการสึกหรอ ใช้ในการทำเครื่องมือ สปริงแหนบ ลูกปืน [12]

สมบัติโดยรวมของเหล็กกล้าคาร์บอน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เพิ่มความแข็ง
2. เพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิปกติและอุณหภูมิสูง
3. เพิ่มคุณสมบัติทางฟิสิกส์
4. เพิ่มความต้านทานการสึกหรอ
5. เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน
6. เพิ่มคุณสมบัติทางแม่เหล็ก
7. เพิ่มความเหนียวแน่นทนต่อแรงกระแทก

2.6.1 การควบคุมปริมาณความร้อนในการเชื่อม (Heat input)

ความร้อนที่เกิดขึ้นในการเชื่อมที่สูงเกินไปจะส่งผลเสียต่อสมบัติเชิงกล ปกติเหล็กกล้าไร้สนิมจะใช้ปริมาณความร้อนในการเชื่อมน้อยกว่าเหล็กคาร์บอน 20-30% เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าการนำความร้อนต่ำ การแผ่กระจายความร้อนจึงช้าต้องแก้ไข โดยการใช้แผ่นทองแดงประกบชิ้นงานช่วยกระจายความร้อน นอกจากนี้อาจลดกระแสไฟฟ้าเชื่อม ลดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า เพิ่มความเร็วการเดินแนวเชื่อมและเลือกใช้กระบวนการเชื่อมที่มีผลสะสมปริมาณความร้อนให้น้อยที่สุด

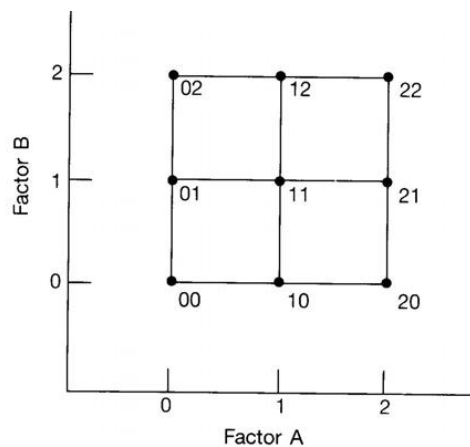
สมการที่ใช้คำนวณหาปริมาณความร้อนเข้าในการเชื่อม

$$\begin{aligned} \text{Energy Input} &= \frac{\text{โวลต์} \times \text{แอมป์แปร์} \times 60}{\text{ความเร็วเชื่อม (มม./นาท)} \times 1000} \\ \text{Heat Efficiency} &= \\ \text{Heat input (Kj/mm)} &= \text{Energy Input} \times \text{Heat Efficiency} \end{aligned}$$

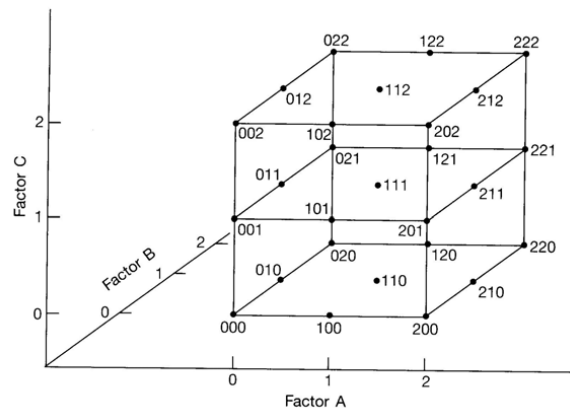
- หมายเหตุ
- ปริมาณความร้อนเข้า [Heat input (Kj/mm)]
 - แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม [V = arc voltage]
 - กระแสไฟฟ้าเชื่อม [A = welding current (A)]
 - ความเร็วเชื่อม [S = welding speed (mm/ min)]

2.6.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3^2

การออกแบบที่ง่ายที่สุดในระบบ 3^k คือการออกแบบ 3^2 ซึ่งประกอบด้วย 2 ปัจจัย (A และ B) แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ คือ ต่ำ ปานกลาง และสูง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับทั้ง 3 อาจใช้เป็นตัวเลข 0 (ต่ำ), 1 (ปานกลาง) และ 2 (สูง) ดังนั้นการทดลองนี้มีการทดลองรวมปัจจัย $3^2 = 9$ การทดลองระดับขึ้นความถี่ของการทดลองรวมปัจจัยจะมีค่าเท่ากับ 8 ผลหลัก A และ B จะมีระดับขึ้นความถี่เท่ากับ 2 และอันตรกิริยา AB จะมีระดับขึ้นความถี่เท่ากับ 4 ถ้าจำนวนของการเรพลิเคตเท่ากับ n ค่าของระดับขึ้นความถี่ทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ $n3^2 - 1$ และค่าผิดพลาดของระดับขึ้นความถี่เท่ากับ $3^2(n-1)$ (รูปที่ 2.23 และ 2.24) [13]



รูปที่ 2.23 การทดลองรวมปัจจัยของการออกแบบ 3^2



รูปที่ 2.24 การทดลองร่วมปัจจัยของการออกแบบ 3^2 ในลักษณะ 3 มิติ

ค่าผลรวมของกำลังสองสำหรับ A, B และ AB สามารถหาได้จากวิธีปกติ พิจารณาผลรวมของกำลังสองของ A, B และ AB กำหนดให้ว่าคอนแทรกต์ที่จะใช้ในการประมาณผลของ A คือ

$$\text{Contrast}_a = ab + a - b - (1)$$

เรียกคอนแทรกต์นี้ว่า ผลทั้งหมด (Total Effect) ของ A พบว่าคอนแทรกต์นี้ยังสามารถใช้ในการประมาณผลของ B และ AB ได้อีกด้วย ยิ่งกว่านั้นคอนแทรกต์เหล่านี้ยังมีรูปแบบในเชิงตั้งฉาก (Orthogonal) และผลรวมของกำลังสองของคอนแทรกต์ใด ๆ จะหาได้จากคอนแทรกต์ยกกำลังสองหารด้วยผลคูณของจำนวนของข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ในคอนแทรกต์นั้น กับผลรวมกำลังสองของสัมประสิทธิ์ของคอนแทรกต์ ดังนั้น ผลรวมของกำลังของ A, B และ AB สามารถเขียนได้ดังนี้

$$SS_A = \frac{[ab + a - b - (1)]^2}{4n}$$

$$SS_B = \frac{[ab + b - a - (1)]^2}{4n}$$

$$SS_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{4n}$$

และผลรวมทั้งหมดของกำลังสองสามารถหาได้จาก

$$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2}{4n}$$

ปกติแล้ว SS_T จะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $4n-1$ และค่าผิดพลาดของผลรวมของกำลังสองซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $4(n-1)$ สามารถคำนวณได้จาก

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$$

โดยใช้ SS_A , SS_B และ SS_{AB} ผลสรุปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนปรากฏดังตารางที่ 2.5 ผลหลักทั้งคู่มิผลอย่างมีนัยสำคัญและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ B มีผลหรือไม่ ซึ่งตาราง ANOVA นี้ช่วยยืนยันการตีความหมายของข้อมูลจากขนาดของปัจจัยดังได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว

2.7 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

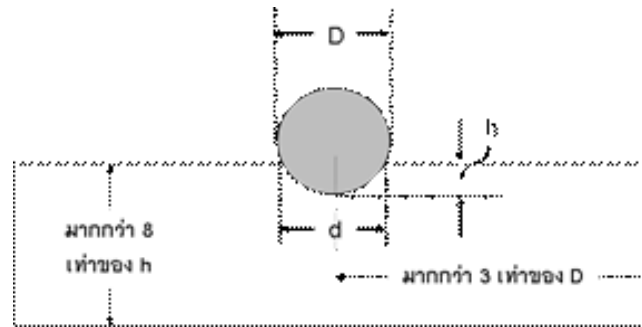
ความแข็ง คือ ความต้านทานต่อแรงกด การขีดสีและการกลึงของวัสดุ ดังนั้นการทดสอบความแข็งจึงสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในเชิงโลหะวิทยาการวัดความแข็ง จะเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดลงบนชิ้นงานทดสอบ โดยมีวิธีในการทดสอบที่นิยมใช้งาน ดังนี้ [14]

2.7.1 Brinell Hardness Test (H_B)

เป็นการวัดความแข็งโดยอาศัยแรงกดคงที่ กระทำกับลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว โดยพื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นผิวโค้ง ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความแข็งได้ตามสูตร ดังนี้ [14]

$$H_B = \frac{P}{\pi \frac{D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

- โดยที่
- H_B คือ ค่าความแข็งแบบ Brinell (kgf/mm^2)
 - P คือ แรงกด (kgf)
 - D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลเหล็กกล้า (mm.)
 - d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (mm.)



รูปที่ 2.25 แสดงการทดสอบแบบ Brinell

แรงกดสำหรับการทดสอบจะอยู่ในช่วง 500-3000 kgf ลูกบอลเหล็กกล้าจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 - 10 มม. โดยใช้ระยะเวลาในการกดประมาณ 10-15 วินาที สำหรับเหล็กหรือเหล็กกล้า และ 30 วินาที สำหรับโลหะนุ่ม (เช่น ตะกั่ว ดีบุก เป็นต้น) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโลหะมีความแข็งที่แตกต่างกัน หากโลหะที่ทดสอบนิ่มและใช้แรงกดมาก จะมีผลทำให้ระยะที่หัวกดจมลงไปลึกมาก จนอาจเกินกว่าครึ่งลูก ซึ่งจะมีผลต่อการคำนวณค่าความแข็งผิดพลาดได้ หรือหากเลือกแรงกดน้อยไปเมื่อเทียบกับขนาดของลูกบอลเหล็กกล้าก็จะทำให้การแปลผลทำได้ไม่แม่นยำเช่นกัน ดังนั้นการเลือกใช้แรงกด และขนาดลูกบอลแตกต่างกันไปด้วยเพื่อป้องกันข้อบกพร่อง ที่จะพบได้ในการทดสอบด้วยวิธีนี้ เราสามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วน P/D^2 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 แสดงอัตราส่วน P/D^2 [14]

โลหะ	ค่าความแข็งโดยประมาณ (HB)	อัตราส่วน P/D^2
เหล็กกล้าและเหล็กหล่อ	มากกว่า 100	30
ทองแดง, ทองแดงผสม, อะลูมิเนียมผสม	30-200	10
อะลูมิเนียม	15-100	5
ดีบุก, ดีบุกผสม, ตะกั่ว, ตะกั่วผสม	3-20	1



รูปที่ 2.26 แสดงลักษณะการทดสอบแบบ Brinell ที่ไม่ถูกต้อง

สำหรับการทดสอบเหล็กกล้าชุบแข็ง หรือโลหะที่มีความแข็งสูงมากๆ จะไม่สามารถทดสอบด้วยลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งได้ จะต้องใช้ลูกบอลทังสเตนคาร์ไบด์ขนาด 2.45 มม. แทนซึ่งจะใช้สำหรับทดสอบวัสดุที่แข็งตั้งแต่ 444 ถึง 627 H_B

ข้อควรระวังสำหรับการวัดความแข็งด้วยวิธีนี้ ได้แก่

1. ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องเรียบ เพื่อให้ได้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่แน่นอน และที่ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มี oxide scale หรือสิ่งแปลกปลอม นอกจากนี้การเตรียมผิวต้องระวังอย่างมาก โดยหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (heating) และกรรมวิธีเย็น (cold working)
2. ต้องระวังตำแหน่งการทดสอบ โดยให้ระยะหัวกดอยู่ห่างจากขอบแต่ละด้าน ของชิ้นงานอย่างน้อย 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล ระยะห่างของแต่ละรอยกดห่างกันอย่างน้อย 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล และชิ้นงานต้องมีความหนาอย่างน้อย 8 เท่าของความลึกของการกด
3. ควรวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด 2 ครั้งในแนวตั้งฉากกัน แล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำไปคำนวณหาความแข็งต่อไป

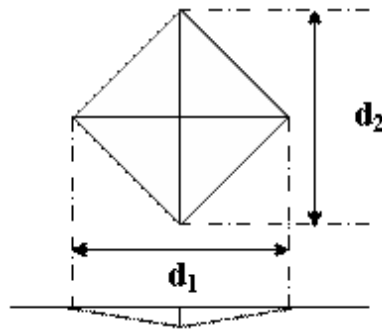
การวัดความแข็งแบบ Brinell มีข้อดี คือ ในการกด 1 ครั้งจะครอบคลุมหลายๆ เฟสของชิ้นงาน ทำให้ได้ค่าความแข็งที่สม่ำเสมอ ซึ่งหากวัดด้วยวิธีที่ใช้หัวกดขนาดเล็กมาก อาจทำให้วัดได้เพียงเฟสเดียว ทำให้ค่าความแข็งที่ได้ไม่ได้เป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งของทั้งวัสดุนั้น แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ ชิ้นงานต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะวัดกับหัวกดได้ และไม่ควรวัดกับชิ้นงานที่มีรัศมีผิวโค้งน้อยกว่า 1 นิ้ว

2.7.2 Vickers Hardness Test

เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา (เป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) เป็นเวลา 10-15 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกด ที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวเช่นเดียวกับการทดสอบแบบ Brinell แต่วิธีนี้หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมาก ดังนั้น ในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมาก (VHN ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด เปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ ซึ่งทำให้วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่า Brinell คือ ไม่ต้องคำนึงถึงอัตราส่วน P/D^2 และข้อจำกัดในด้านความหนาของชิ้นงานทดสอบ เนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็กมาก

$$HV = \frac{1.854P}{d^2}$$

โดยที่ HV คือ ค่าความแข็งแบบ Vicker (kgf/mm^2)
 P คือ แรงกด (kgf)
 d คือ ขนาดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 เฉลี่ย (mm.)



รูปที่ 2.27 แสดงลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของ Vickers Hardness Test

ข้อควรระวังสำหรับการวัดความแข็งด้วยวิธีนี้ ได้แก่

- การเลือกใช้น้ำหนักกดมีผลต่อความแข็งด้วย คือ ถ้าเลือกน้ำหนักน้อยเกินไป จะได้ค่าความแข็งที่ผิด แต่ถ้าใช้น้ำหนักมากเกินไป อาจทำให้เกิดปัญหากับหัวกดเพชรตอนคลายหัวกดได้
- ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มี oxide scale หรือสิ่งแปลกปลอม การเตรียมผิวของชิ้นทดสอบต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก และหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (heating) หรือกรรมวิธีเย็น (cold working)
- ไม่ควรวัดความแข็งในบริเวณที่ใกล้กับตำแหน่งเดิม โดยควรเว้นระยะห่างไว้ไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด ทั้งตามแนวแกน x และ y
- ความหนาชิ้นงานทดสอบควรมากกว่าอย่างน้อย 1.5 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยกด และหลังจากการทดสอบวัดความแข็ง ไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ให้เห็นทางด้านหลัง (อีกด้านหนึ่ง) ของชิ้นงานทดสอบ
- การอ่านค่าความยาวเส้นทแยงมุม จะขึ้นกับสายตาของแต่ละคน ดังนั้นควรให้คนใดคนหนึ่งเป็นผู้อ่านค่า

วิธีการทดสอบนี้ไม่เป็นที่นิยมในการใช้งานสำหรับภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากข้อจำกัดที่ทดสอบได้ช้า ต้องมีเตรียมผิวที่ดี เพื่อให้ได้ค่าเส้นทแยงมุมของรอยกดที่แน่นอน และมีโอกาสผิดพลาดในการวัดระยะเส้นผ่านศูนย์กลางได้

2.7.3 Rockwell Hardness Test

เป็นวิธีวัดความแข็งของโลหะที่นิยมใช้มากที่สุด โดยจะวัดความแข็งจากความลึกกระยะกดที่ถูกหัวกดกดด้วยแรงคงที่ ซึ่งจะแตกต่างจากแบบ Brinell และ Vicker ที่วัดจากแรงกดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังนั้น วิธีนี้จึงมีการวัดด้วยกันหลายสเกล เพื่อสามารถเลือกใช้วัดความแข็งได้เหมาะสมที่สุด แรงที่ใช้กดมี 2 ส่วน คือ minor load และ major load

1. Minor load เป็นแรงที่ยึดหัวกดลูกบอลเหล็กชุบแข็ง หรือหัวกดเพชรไว้บนผิวโลหะที่จะวัดความแข็ง
2. Major load เป็นแรงที่มากกว่า minor load และกดลงภายหลังจากให้ minor load กับชิ้นงาน สำหรับมาตรฐานความแข็งแบบ Rockwell มีอยู่ 15 สเกล (ไม่รวม superficial hardness scale) ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงการวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่าง ๆ

สเกล	ประเภทหัวกด	Major load, kgf	การใช้งานทั่วไป
A	หัวกดเพชร (two scales-carbide and steel)	60	ซีเมนต์คาร์ไบด์, เหล็กกล้าที่มีขนาดบาง และเหล็กกล้าชุบแข็งผิวไม่ลึก (shallow case-hardening steel)
B	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	100	โลหะผสมของทองแดง (Copper alloys), เหล็กกล้าที่ไม่แข็งมาก (soft steels), โลหะผสมของอะลูมิเนียม (aluminum alloys) และเหล็กหล่ออบเหนียว (malleable iron)
C	หัวกดเพชร	150	เหล็กกล้า, เหล็กหล่อที่มีความแข็งสูง (hard cast irons), เหล็กหล่ออบเหนียวชนิดเพอร์ริติก, ไทเทเนียม, เหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิวลึก และวัสดุอื่นๆ ที่มีความแข็งมากกว่า 100 HRB

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) แสดงการวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่าง ๆ

สเกล	ประเภทหัตถ์	Major load, kgf	การใช้งานทั่วไป
D	หัตถ์เพชร	100	เหล็กกล้าที่มีขนาดบาง และเหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิว และเหล็กหล่ออบเหนียวชนิดเพอร์ริติก
B	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	100	โลหะผสมของทองแดง (Copper alloys), เหล็กกล้าที่ไม่แข็งมาก (soft steels), โลหะผสมของอะลูมิเนียม (aluminum alloys) และเหล็กหล่ออบเหนียว (malleable iron)
C	หัตถ์เพชร	150	เหล็กกล้า, เหล็กหล่อที่มีความแข็งสูง (hard cast irons), เหล็กหล่ออบเหนียวชนิดเพอร์ริติก, ไทเทเนียม, เหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิวลึก และวัสดุอื่นๆ ที่มีความแข็งมากกว่า 100 HRB
D	หัตถ์เพชร	100	เหล็กกล้าที่มีขนาดบาง และเหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิว และเหล็กหล่ออบเหนียวชนิดเพอร์ริติก
E	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	100	เหล็กหล่อ, โลหะผสมของอะลูมิเนียม โลหะผสมของแมกนีเซียม และโลหะสำหรับผลิตเบร้ง
F	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	60	โลหะผสมของทองแดงที่ผ่านการอบอ่อน และโลหะแผ่นบางที่ไม่แข็ง
G	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	150	บรอนซ์ผสมฟอสฟอรัส (Phosphor bronze), โลหะผสมทองแดง-เบริลเลียม (beryllium copper), เหล็กหล่ออบเหนียว. โดยความแข็งสูงสุดที่วัดได้จะต้องไม่เกิน 92 HRG เพื่อป้องกันหัตถ์เสียหาย
H	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	60	อะลูมิเนียม, สังกะสี และตะกั่ว
K	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) แสดงการวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่าง ๆ

สเกล	ประเภทหัวกด	Major load, kgf	การใช้งานทั่วไป
L	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	60	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและ นุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็ก และใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
M	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	100	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและ นุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็ก และใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
P	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและ นุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็ก และใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
L	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	60	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและ นุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็ก และใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
M	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	100	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและ นุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็ก และใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
P	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและ นุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็ก และใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
R	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.)	60	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและ นุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็ก และใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
S	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/2 นิ้ว	100	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและ นุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็ก

ที่มา : Hawkins and Hultgren (1995) [14]

ค่าความแข็งจะแสดงเป็น 2 ส่วน คือ ตัวเลขค่าความแข็งที่วัดได้ และสัญลักษณ์ของสเกลที่ใช้วัด ตัวอย่าง เช่น 64.0 HRC หมายความว่า ตัวเลขความแข็งที่อ่านได้เท่ากับ 64.0 ด้วยการวัดแบบ Rockwell สเกล C ที่ใช้หัดกดเพชรและมีค่า major load เท่ากับ 100 kgf

ส่วนใหญ่การทดสอบเหล็กกล้า และวัสดุอื่นๆ จะใช้เป็น Rockwell สเกล C และ B อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไม่ได้มีการกำหนดสเกลที่ชัดเจน ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยอื่นๆ ด้วย เพื่อให้เลือกใช้สเกลได้เหมาะสมที่สุด ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่

- ชนิดของวัสดุ โดยทั่วไปผลการทดสอบที่ดีที่สุด ได้จากการใช้แรงกดสูงที่สุดเท่าที่ชิ้นงานทดสอบจะสามารถรับได้ และจากตารางที่ 1 จะบอกได้ว่าวัสดุที่ทดสอบควรใช้สเกลแบบไหน เช่น วัสดุแข็ง เช่น เหล็กกล้าหรือทังสเตนคาร์ไบด์ จะต้องใช้สเกล A, C, D เท่านั้น

- ความหนาของชิ้นงานทดสอบ ควรมากกว่าความลึกของรอยกดอย่างน้อย 10 เท่า เพื่อให้ได้ค่าความแข็งที่ถูกต้อง ซึ่งการวัดความลึกรอยกด แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

- ความลึกรอยกด = $(100 - \text{ค่าความแข็งที่วัดได้}) \times 0.002$ สำหรับหัวกดเพชร

- ความลึกรอยกด = $(130 - \text{ค่าความแข็งที่วัดได้}) \times 0.002$ สำหรับหัวกดบอล

นอกจากนี้ภายหลังการทดสอบจะต้องไม่มีรอยนูนเกิดขึ้นทางด้านหลังของชิ้นงานทดสอบด้วย

- รูปร่างของชิ้นงานทดสอบ และตำแหน่งในการวัด

- ชิ้นงานรูปทรงยาว จะต้องติดตั้งแท่นรองรับเพื่อให้มั่นใจได้ว่า ผิวทดสอบที่การวัดความแข็ง ตั้งฉากกับแนวกดของหัวกด

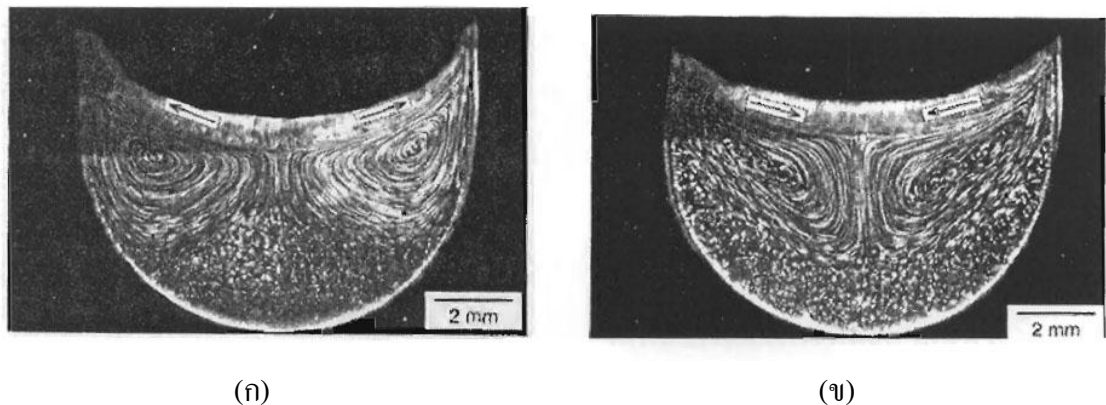
- ชิ้นงานทรงกระบอก การวัดค่าความแข็งให้ถูกต้องจะต้องใช้ค่า correction factor ช่วยปรับค่าความแข็งที่อ่านได้ เนื่องจากในการวัดความแข็งของผิวนูน (convex) หัวกดจะกดลงไปลึกมากกว่าปกติ ดังนั้นค่าที่อ่านได้จะน้อยกว่าความเป็นจริง ดังนั้นค่า correction factor จะถูกบวกเข้าไป เมื่อวัดความแข็งกับผิวชิ้นงานทรงกระบอก การวัดความแข็งชิ้นงานทรงกระบอกจะต้องใช้ แท่นตัววี (V anvil) เพื่อช่วยรองรับชิ้นงานทดสอบให้อยู่นิ่งกับที่

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซัชชัย อินนุมาตร[15] ได้ศึกษาอิทธิพลของอนินทรีย์ฟลักซ์ ต่อการหลอมลิกและสมบัติทางกล ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก ด้วยกรรมวิธีการเชื่อม แบบก๊าซทังสเตนอาร์ค พบว่า ฟลักซ์ที่ทำจาก Titanium Oxide (TiO_2) บริสุทธิ์เป็นฟลักซ์ที่ให้ประสิทธิภาพในการเพิ่มระดับ การหลอมลิกสูงสุดและมีความสามารถในการเกาะติดผิวชิ้นงานได้ดีมาก ส่วนฟลักซ์ที่ให้ ประสิทธิภาพ ด้อยที่สุดคือฟลักซ์ที่ทำจากผง Aluminium Oxide (Al_2O_3) อย่างไรก็ตามการผสม สารเคมีทั้งสองชนิด เข้าด้วยกันเพื่อใช้เป็นฟลักซ์สำหรับการเชื่อมสามารถกระทำได้โดยจะต้องมีส่วนผสมของ

Aluminium Oxide (Al_2O_3) ไม่เกินร้อยละ 50 เนื่องจากว่าส่วนผสมของ Aluminium Oxide (Al_2O_3) เกินร้อยละ 50 จะทำให้แนวโน้มของระดับการหลอมลึกของแนวเชื่อมลดลง

จากการศึกษาของ Limmanivichitr และ Kou [16] พบว่า หากเติมสารที่ส่งผลต่อสมบัติของผิวโลหะหลอมเหลว (Surface Active Agent) ลงไปในแอ่งหลอมละลายจะมีผลต่อแรงตึงผิวของโลหะหลอมเหลว โดยทำให้บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อมซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ใต้การอาร์คจะมีแรงตึงผิวสูงที่สุดในขณะที่บริเวณขอบของแนวเชื่อมด้านนอกมีแรงตึงผิวดำ จะทำให้ลักษณะการไหลของโลหะหลอมเหลวไหลเวียนจากขอบของแนวเชื่อมไปยังจุดศูนย์กลางของแนวเชื่อม ดังรูป 2.12 C และ D โดยได้มีการจำลองพลาสมานี้ไว้อย่างชัดเจนและแสดงไว้ในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.28 การพาโลหะหลอมเหลว อันเนื่องมาจากการเติมสารที่ส่งผลของผิวโลหะหลอมเหลว

(ก) ไม่มีการเติมสารที่ส่งผลต่อสมบัติของผิวโลหะหลอมเหลว

(ข) เมื่อเติมสารที่ส่งผลต่อสมบัติของผิวโลหะหลอมเหลว

N.Suutala [17] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มความเร็วในการเชื่อม นอกจากจะทำให้เกิดรอยบกพร่องในเนื้อโลหะรอยเชื่อมแล้วยังทำให้ปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรต์ลดลงด้วย พบว่า เมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 2.5 เซนติเมตรต่อนาที เป็น 80 เซนติเมตรต่อนาที เฟอร์ไรต์นั้นมีปริมาณลดลง 1 ถึง 2 หน่วย สำหรับการเชื่อมการปรับตัวแปรการเชื่อม ทั้งกระแสไฟฟ้าเชื่อมและความเร็วเชื่อม ต้องมีความสัมพันธ์กัน เพื่อให้ได้รอยซึมลึกสมบูรณ์ (Complete penetration) การเพิ่มความเร็วเชื่อมสูงขึ้นต้องปรับกระแสไฟฟ้าเชื่อมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งก่อให้เกิดรอยบกพร่องมากขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาตัวแปรการเชื่อมเพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่สมบูรณ์

Paskell [18] ได้ศึกษาการเชื่อมสแตนเลสชนิดออสเทนนิค พบว่าระดับการหลอมลิกนั้นจะมีหลายแบบแตกต่างกัน เนื่องจากส่วนผสมทางเคมีในแต่ละครั้งของการผลิตแตกต่างกันเล็กน้อย ธาตุบางตัวมีบทบาทสำคัญต่อการหลอมลิกและความกว้างของแนวเชื่อมเช่น กำมะถัน (Sulfur) โดยเมื่อมีปริมาณกำมะถันมากขึ้น จะทำให้ระดับการหลอมลิกมากขึ้นตามไปด้วยและความกว้างของแนวเชื่อมจะลดลง แต่ในทางปฏิบัติต้องควบคุมปริมาณกำมะถันให้มีอยู่ในเนื้อเหล็กไว้ให้น้อยที่สุด เพื่อป้องกันปัญหาจากการเชื่อม เช่น การแตกร้าวในขณะที่โลหะแข็งตัว เป็นต้น ดังนั้นการที่ส่วนผสมทางเคมีแม้จะคงอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ในมาตรฐานและปัจจัยในการเชื่อมแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยก็ทำให้มีโอกาสได้รอยเชื่อมที่มีความแปรผันสูง ดังนั้นฟลักซ์ที่ใช้ทาลงบนชิ้นงานก่อนการเชื่อมโดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มระดับการหลอมลิกของแนวเชื่อม จึงช่วยลดความแปรผันของการหลอมต่ำ จึงมีประโยชน์อย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมต่างๆที่จำเป็นต้องอาศัยการเชื่อม