

ภาพรวมของเทคนิคการอุ่นลวดเชื่อมเปลือยด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ ในการเชื่อม GTAW และ GMAW

Overview of Induction Hot Wire Preheating Techniques in GTAW and GMAW

ภูวดล ถนัดหัตถกรรม¹, ศักดิ์พัฒน์ จตุพรเพิ่ม¹, ธนวัฒน์ แสนทวี¹, สุรพิชญ์ โพธิ์ศรี¹ และ อภิชาติ โรจนโรวรรณ^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Bhuwadol Thanathattakum¹, Sakdipat Jaturapronperm¹, Thanawat Santawee¹,

Surapit Posri¹ and Aphichart Rodchanarowan^{1*}

¹Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

Corresponding Author Email : fengacrw@ku.ac.th

Received 20 April 2025

Revised 06 July 2025

Accepted 04 August 2024

บทคัดย่อ

การอุ่นลวดก่อนการเชื่อมด้วยขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนเป็นเทคนิคที่ถูกพัฒนามาประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการเชื่อมต่างๆ เช่น การเชื่อมทั้งสแตนเลสสปีคคูลุม และการเชื่อมโลหะแก๊สสปีคคูลุม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหลอมละลายของลวดเชื่อม โดยลดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิลวดเชื่อมกับอุณหภูมิของชิ้นงาน ส่งผลให้อัตราการเติมเนื้อโลหะสูงขึ้นโดยไม่เพิ่มปริมาณความร้อนที่เข้าสู่แนวเชื่อม นอกจากนี้ เทคนิคดังกล่าวยังมีผลดีต่อสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว และความต้านทานต่อแรงกระแทก รวมถึงลดความเสี่ยงของการเกิดรูพรุน เนื่องจากการอุ่นลวดช่วยกำจัดความชื้นที่ผิวของลวดเชื่อมก่อนการเชื่อม อีกทั้งยังลดค่าความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน ส่งผลให้เกรนมีความละเอียดขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น บทความนี้นำเสนอการศึกษาผลของการเชื่อมแบบอุ่นลวดด้วยขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนที่ส่งผลต่ออัตราการเติมเนื้อโลหะ โครงสร้างจุลภาค สมบัติเชิงกล รวมไปถึงผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนต่อการเชื่อม

คำสำคัญ: การเชื่อมอาร์ก, การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสปีคคูลุม, การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สสปีคคูลุม, การอุ่นลวดเชื่อม, ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

Abstract

Preheating filler wire before welding using induction heating coils is a technique that has been developed and applied to various welding processes, such as Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) and Gas Metal Arc Welding (GMAW), to improve the melting efficiency of the filler wire. This is achieved by reducing the temperature difference between the filler wire and the base material, resulting in a higher deposition rate without increasing the overall heat input to the weld. In

addition, this technique benefits the mechanical properties of the weld, such as hardness, toughness, and impact resistance. It also helps to reduce the risk of porosity, as preheating assists in removing moisture on the surface of the filler wire prior to welding. Moreover, it reduces the heat input into the workpiece, leading to finer grain structures and increased hardness in the weld zone. This article presents a study on the effects of preheating filler wire using induction heating coils on deposition rate, microstructure, mechanical properties, and the influence of electromagnetic fields induced by the heating coils on arc stability and weld quality

Keywords: Arc Welding, GTAW, GMAW, Hot Wire, Induction Heating Coil

1. บทนำ

กระบวนการเชื่อมถูกนำมาใช้เพื่อประสานโลหะให้ติดกัน หนึ่งในวิธีการเชื่อมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือการเชื่อมไฟฟ้า โดยอาร์กระหว่างลวดเชื่อมไฟฟ้ากับชิ้นงานเพื่อสร้างความร้อนที่ใช้ในการหลอมโลหะ ซึ่งนิยมกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมโครงสร้างเหล็ก, อุตสาหกรรมระบบท่อ, อุตสาหกรรมยานยนต์ และ อุตสาหกรรมต่อเรือ เป็นต้น เพราะให้ความแข็งแรงกับรอยต่อที่สูง และอายุการใช้งานที่ยาวนาน นอกจากนี้การเชื่อมไฟฟ้ายังแบ่งตามลักษณะวิธีการที่แตกต่างกัน ตัวอย่างการเชื่อมอาร์กที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เช่น การเชื่อมอาร์กทังสเตน แก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding; GTAW) และการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding; GMAW) ซึ่งแต่ละกระบวนการก็จะมีจุดเด่น จุดด้อยที่แตกต่างกันไป [1], [2], [3], [4]

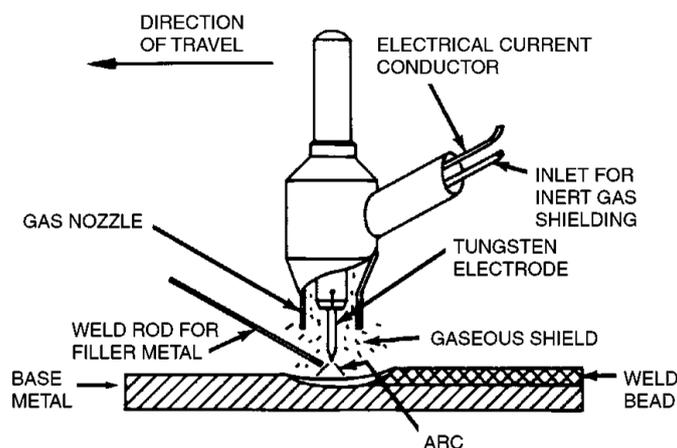
ในปัจจุบันได้นำเทคนิคต่างๆ มาประยุกต์ใช้กับการเชื่อม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในงานเชื่อม เช่น เทคนิคการสั่น (Oscillation) เทคนิคการใช้กระแสพัลส์ (Pulsed Current) และเทคนิคการอุ่นลวดเชื่อม (Hot Wire) เป็นต้น หนึ่งในเทคนิคสำคัญที่จะกล่าวถึงคือเทคนิคการอุ่นลวดเชื่อมก่อนการเชื่อม โดยนำขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนมาใช้ในการอุ่นลวดเชื่อม ซึ่งขดลวดเหนี่ยวนำถูกพัฒนาเพื่อใช้ทำให้โลหะมีอุณหภูมิสูงขึ้นในเวลาที่ยาวนาน โดยเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กในขดลวด ตัวอย่างการนำเทคนิคนี้มาใช้คือการเชื่อมไฟฟ้าทังสเตนแก๊สปกคลุมแบบอุ่นลวด [5] เพื่อใช้อุ่นลวดเติม (Filler Metal) ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนป้อนเข้าสู่แนวเชื่อม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเติมเนื้อแนวเชื่อม และเพิ่มขนาดรูปร่างของแนวเชื่อม ผลของการอุ่นลวดก่อนทำการเชื่อมเป็นการลดความต่างของอุณหภูมิของลวดเชื่อมกับชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม ทำให้การเชื่อมสามารถหลอมลวดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้การเติมเนื้อโลหะในแนวเชื่อมเร็วขึ้นกว่าการเชื่อมปกติ ดังนั้นจึงเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตชิ้นงานสูงขึ้น อีกทั้งช่วยประหยัดต้นทุนในการผลิต [3], [4], [5]

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีการประยุกต์ใช้เทคนิคการอุ่นลวดร่วมกับการเชื่อมอาร์กในหลายกรณีแล้ว แต่ยังคงขาดการศึกษาเปรียบเทียบเชิงลึกในด้านอัตราการเติมเนื้อโลหะ (Deposition Rate), โครงสร้างจุลภาค (Microstructure), สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) รวมไปถึงผลของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ที่เกิดจากขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนต่อการเชื่อม โดยเฉพาะในกระบวนการ GMAW และ GTAW ที่ใช้ระบบอัตโนมัติร่วมด้วย ดังนั้นบทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนและรวบรวมข้อมูลด้านเทคนิคการเชื่อมแบบอุ่นลวดด้วยขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชี้ให้เห็นแนวโน้มของการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ในเชิงอุตสาหกรรม และเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อยอดในอนาคต

2. การเชื่อมอาร์ก (Arc Welding)

2.1 การเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (Gas-Tungsten Arc Welding; GTAW)

การเชื่อม GTAW เป็นการเชื่อมที่อาศัยความร้อนจากการอาร์กระหว่างทังสเตนอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ที่ซึ่งทังสเตนอิเล็กโทรดแบบไม่สิ้นเปลือง (Non Consumable Electrode) จะไม่หลอมลงไปชิ้นงานเนื่องจากมีจุดหลอมที่สูง โดยมีการป้อนลวดเติม (Filler Rod) เข้าสู่แนวเชื่อมระหว่างกระบวนการ เพื่อเพิ่มปริมาณเนื้อโลหะ อีกทั้งในขณะเดียวกันจะป้อนแก๊สปกคลุมเพื่อปกคลุมแนวเชื่อมและอิเล็กโทรด ช่วยป้องกันออกซิเจนหรือธาตุอื่นๆที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับแนวเชื่อม โดยแก๊สปกคลุมที่ใช้ในการเชื่อม GTAW มักเป็นอาร์กอน (Ar) หรือฮีเลียม (He) หรือการผสมระหว่างแก๊สดังกล่าว ซึ่งชนิดของแก๊สปกคลุมส่งผลต่อคุณสมบัติของแนวเชื่อม เช่น ความลึกของการหลอม ความสวยงามของแนวเชื่อม และการสเปรย์อาร์ก [6] จุดเด่นของกระบวนการเชื่อมนี้คือสามารถเชื่อมวัสดุได้อย่างหลากหลาย แต่ข้อด้อยคือความเร็วในการเชื่อมต่ำ ในปัจจุบันได้นำเทคนิคการเชื่อมแบบอุ่นลวดด้วยขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Hot Wire) มาใช้กับการเชื่อม GTAW ที่เป็นแบบกึ่งอัตโนมัติหรืออัตโนมัติ เพื่อเพิ่มความเร็วในการเชื่อม อีกทั้งยังเพิ่มความสามารถในการผลิต [3], [4], [7] ซึ่งกรรมวิธีและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม GTAW แสดงไว้ในรูปที่ 1

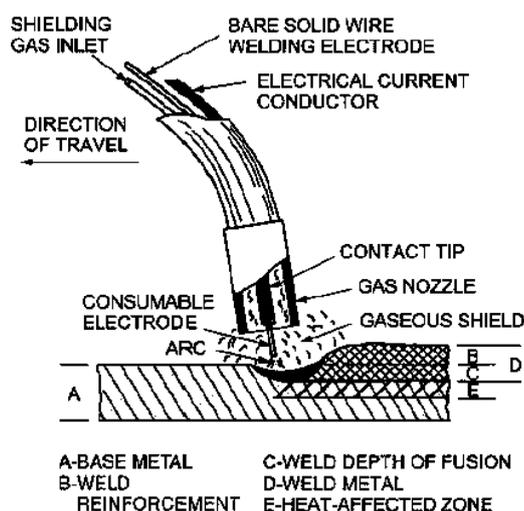


รูปที่ 1 กรรมวิธีการเชื่อม และอุปกรณ์ในการเชื่อม GTAW [4]

2.2 การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding; GMAW)

การเชื่อม GMAW เป็นการเชื่อมที่อาศัยความร้อนจากอาร์กระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน โดยลวดเชื่อมแบบสิ้นเปลือง (Consumable Electrode) ชนิดขดลวด (Wire) ถูกป้อนจากเครื่องป้อนลวดที่ติดตั้งอยู่กับเครื่องเชื่อมเพื่ออาร์กสร้างความร้อนและหลอมลงไปเป็นแนวเชื่อม ในขณะเดียวกันแก๊สปกคลุมถูกป้อนมาจากถังแก๊สเพื่อป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยแก๊สปกคลุมที่ใช้ในการเชื่อม GMAW มักเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) อาร์กอน (Ar) หรือฮีเลียม (He) หรือการผสมระหว่างแก๊สดังกล่าว การถ่ายเทโลหะในกระบวนการเชื่อม GMAW จากลวดเชื่อมไปยังชิ้นงานสามารถเกิดได้หลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้า แรงดัน แก๊สปกคลุม และชนิดของลวด โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 4 โหมดหลัก ได้แก่ โหมดลัดวงจร (Short Circuiting), โหมดหยดโต (Globular), โหมดพ่นละออง (Spray) และ โหมดพ่นละอองแบบพัลส์ (Pulsed Spray) ซึ่งแต่ละโหมดมีลักษณะการหลอมและส่งผ่านโลหะต่างกัน เช่น โหมดลัดวงจรให้ความร้อนต่ำ เหมาะกับงานแผ่นบางและเชื่อมในตำแหน่งทำเชื่อมที่ยาก สำหรับโหมดหยดโตในการเชื่อมส่วนใหญ่จะหลีกเลี่ยงเนื่องจากทำให้เกิดละอองเม็ดโลหะกระเด็นเยอะซึ่งไม่ต้องการในการเชื่อม

ขณะที่โหมดพ่นละอองให้การหลอมที่ต่อเนื่อง สม่ำเสมอ และเหมาะกับการเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนา สำหรับโหมดพ่นละอองแบบพัลส์ เป็นเทคโนโลยีที่ควบคุมการถ่ายเทด้วยกระแสพัลส์ ซึ่งช่วยผสมข้อดีของทั้งโหมดลัดวงจรและโหมดพ่นละออง ทำให้เหมาะกับการเชื่อมอัตโนมัติและงานที่ต้องการความแม่นยำสูง จุดเด่นของกระบวนการเชื่อมนี้คือสามารถเชื่อมได้รวดเร็วเนื่องจาก สามารถติดตั้งกับหุ่นยนต์เชื่อมเพื่อเพิ่มความสามารถและความแม่นยำในการเชื่อม แต่ข้อด้อยของการเชื่อมนี้คือมีความไวต่อสภาพแวดล้อม อุปกรณ์ราคาแพงและซับซ้อน [3], [4], [8], [9] ซึ่งกรรมวิธีและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม GMAW แสดงไว้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กรรมวิธีการเชื่อม และอุปกรณ์ในการเชื่อม GMAW [4]

3. ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน (Induction heating coil)

การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ มีหลักการคือจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในขดลวด เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนทิศทางตลอดเวลา ที่ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้สามารถส่งผ่านไปยังโลหะที่อยู่ใกล้เคียงโดยไม่ต้องสัมผัส เมื่อนำโลหะเข้าไปในสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced Electromotive Force) ในโลหะงาน เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) อยู่ภายในตัวชิ้นงานโลหะซึ่งจะเคลื่อนที่ในทิศทางวนรอบตามสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไป โดยในโลหะมีความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งทำให้กระแสไหลวนสูญเสียพลังงานออกมาในรูปของความร้อน (Joule Heating) ซึ่งเป็นกลไกหลักที่ทำให้โลหะเกิดความร้อนจากภายใน โดยไม่ต้องสัมผัสกับขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน [10], [11], [12], [13]

เทคนิคการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำนิยมใช้กับชิ้นงานที่เป็นโลหะในหลายอุตสาหกรรม เช่น การเชื่อมโลหะ การหลอมโลหะ และการชุบผิวแข็ง เป็นต้น จุดเด่นของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ คือสร้างความร้อนสูงได้อย่างรวดเร็ว สามารถให้ความร้อนเฉพาะจุด ไม่มีการสัมผัสโดยตรงช่วยลดการสึกหรอของเครื่องมือ และไม่มีการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนด้วยเตาเผาแบบดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ก็มีข้อจำกัดบางประการ เช่น ไม่เหมาะกับวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า การออกแบบขดลวดให้เหมาะกับแต่ละชิ้นงานได้ยาก และต้นทุนของอุปกรณ์สูง [12], [14]

ปัจจัยที่ส่งผลในการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำคือ ความถี่ของกระแสไฟฟ้าซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความลึกของการให้ความร้อนกล่าวคือเมื่อใช้ความถี่สูงจะให้ความร้อนตื้นเหมาะกับงานที่ผิว แต่หากใช้ความถี่ต่ำจะให้ความร้อนลึกเหมาะกับงานหนา นอกจากนี้รูปร่างและขนาดของขดลวดยังส่งผลต่อการให้ความร้อนโดยขดลวดที่รูปร่างต่างกัน เช่น ขดลวดทรงกระบอก, ขดลวดแบน, หรือรูปตัวยู จะให้ความร้อนต่างกัน [15] ซึ่งขนาดของขดลวดและจำนวนรอบส่งผลต่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก ชิ้นงานที่อยู่ใกล้ขดลวดมากเกินไปอาจเกิดการสะสมความร้อนสูงเกินไป หรือกระแส

ลัดวงจร ในขณะที่ชิ้นงานที่อยู่ไกลเกินไปจะได้รับพลังงานไม่เพียงพอ ส่งผลให้การให้ความร้อนไม่มีประสิทธิภาพ [12], [16]

สมบัติของวัสดุชิ้นงาน เช่น ค่าความต้านทานไฟฟ้า และค่าความนำแม่เหล็กไฟฟ้า ส่งผลต่อความสามารถในการรับพลังงานจากสนามแม่เหล็ก เนื่องจากวัสดุที่มีความต้านทานสูงจะเกิดความร้อนได้ดีกว่าวัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงมาก นอกจากนี้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปส่งผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิโดยตรงจำเป็นต้องออกแบบให้เหมาะสมกับปริมาณความร้อนที่ต้องการและเวลาที่ใช้ รวมไปถึงอัตราการเคลื่อนที่ในทางปฏิบัติ เช่น การอุ่นลวดเชื่อมหรือการชุบผิวแข็ง ความเร็วในการป้อนชิ้นงานโลหะผ่านขดลวดส่งผลต่อการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ หากชิ้นงานเคลื่อนที่เร็วเกินไปอาจส่งผลให้อุณหภูมิไม่ถึงระดับที่กำหนด จำเป็นต้องปรับสมดุลระหว่างระยะเวลาเหนี่ยวนำกับอุณหภูมิที่ต้องการ [12], [17]

4. เทคนิคการอุ่นลวดก่อนการเชื่อมด้วยขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Hot Wire; IHW)

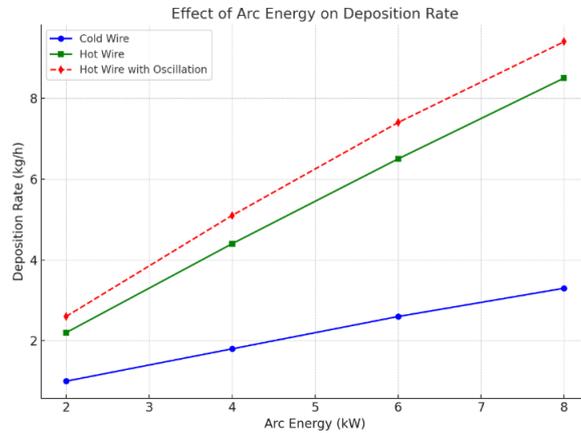
เทคนิคการเชื่อมด้วยการอุ่นลวดก่อนการเชื่อมด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ ทำโดยติดตั้งขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน และแหล่งจ่ายไฟของขดลวดในบริเวณก่อนการอาร์ก จากนั้นเมื่อทำการเชื่อม ลวดเชื่อมถูกป้อนจากเครื่องป้อนลวดผ่านขดลวดเหนี่ยวนำทำให้ลวดเชื่อมร้อนแล้วป้อนลงสู่แนวเชื่อมจากการอาร์ก แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับขดลวดเป็นแหล่งจ่ายแยกที่จ่ายไฟให้อุปกรณ์เหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งไม่ใช่กระแสหลักที่ใช้อาร์ก การอุ่นลวดก่อนการเชื่อมถูกใช้เพื่อให้อุณหภูมิของลวดเชื่อมให้สูงขึ้นใกล้เคียงกับจุดหลอมละลายของชิ้นงาน ซึ่งช่วยลดความต่างของอุณหภูมิลวดเชื่อมและอุณหภูมิงานก่อนการเชื่อม ส่งผลให้ลวดเชื่อมพร้อมที่จะหลอมละลายเมื่อได้รับความร้อนจากการอาร์ก อีกทั้งการอุ่นลวดช่วยให้การถ่ายเทพลังงานจากอาร์กไปยังลวดเชื่อมมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้ลวดหลอมละลายได้รวดเร็วโดยไม่ต้องเพิ่มพลังงานของอาร์กโดยตรง ส่งผลให้อัตราการเติมเนื้อโลหะ และความเร็วในการเชื่อมสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการเชื่อมที่ไม่อุ่นลวด (Cold Wire) [5] ซึ่งแสดงในรูปที่ 3 นอกจากนี้วิธีการอุ่นลวดก่อนการเชื่อมยังมีวิธีคือนำลวดเชื่อมไปอบหรือเผาในเตาก่อนนำมาเชื่อม แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือจะสูญเสียความร้อนจากอุ่นก่อนที่จะเชื่อมเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปการอุ่นลวดก่อนการเชื่อมด้วยขดลวดเหนี่ยวนำจะใช้กระแสสลับเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเปลวอาร์กเปียงเบน (Arc Blow) ซึ่งเทคนิคการเชื่อมด้วยการอุ่นลวดนี้จะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามกระบวนการเชื่อมที่นำมาใช้ โดยในบทความนี้จะเน้นไปที่กระบวนการเชื่อม GMAW และ GTAW

เพื่อควบคุมและทราบถึงอุณหภูมิของลวดเชื่อมที่ถูกอุ่นลวดอย่างแม่นยำก่อนเข้าสู่แนวเชื่อม ระบบการอุ่นลวดด้วยขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนสามารถติดตั้ง เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส เช่น Infrared Thermometer หรือ Pyrometer ไว้หลังขดลวดเหนี่ยวนำและก่อนบริเวณหัวเชื่อม ซึ่งเซนเซอร์เหล่านี้ช่วยตรวจสอบอุณหภูมิจริงของลวด ณ เวลานั้นขณะทำการเชื่อม ทำให้สามารถปรับค่ากระแสเหนี่ยวนำหรือความเร็วป้อนลวดได้ตามความเหมาะสม อีกทั้งลดความเสี่ยงที่ลวดร้อนเกินไปหรือเย็นเกินไป ซึ่งอาจกระทบต่อการหลอมลวดหรือเสถียรภาพของบ่อหลอม โดยเฉพาะในระบบเชื่อมอัตโนมัติที่ต้องการความแม่นยำสูง [18]

4.1 การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุมแบบอุ่นลวดด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ

โดยทั่วไปในการเชื่อม GTAW แบบธรรมดาการป้อนลวดทำโดยตัวของช่างเชื่อม แต่ในการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติลวดเชื่อมจะถูกป้อนด้วยเครื่องป้อนลวดคล้ายกับเครื่องป้อนลวดในการเชื่อม GMAW สำหรับการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุมแบบอุ่นลวดด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Hot Wire Gas Tungsten Arc Welding; IHW-GTAW) ทำโดยติดตั้งอุปกรณ์อุ่นลวดหลังจากเครื่องป้อนลวด และก่อนบริเวณที่จะป้อนเข้าสู่แนวเชื่อม ช่วยลดเวลาในการละลายลวด ป้องกันความร้อนสะสมในชิ้นงาน และเพิ่มความแม่นยำในระบบอัตโนมัติ วิธีนี้ถูกใช้ที่ต้องการคุณภาพแนวเชื่อมสูง เช่น ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ท่อแรงดัน หรือเครื่องบิน อย่างไรก็ตาม การใช้งานระบบอุ่นลวดจำเป็นต้องควบคุมทั้งกระแสไฟที่ใช้ในการอุ่นลวด และความเร็วในการป้อนลวดให้สัมพันธ์กัน หากใช้กระแส

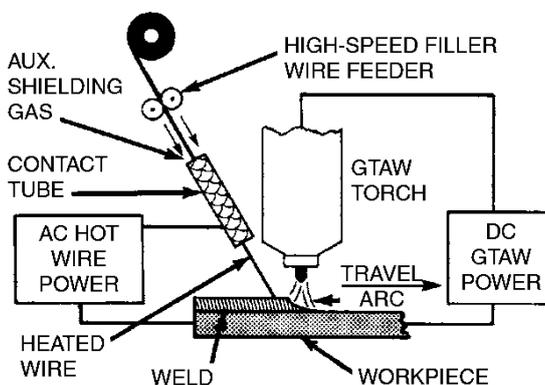
มากเกินไป แต่ป้อนลวดช้าเกินไป จะทำให้ลวดร้อนเกินความจำเป็น จนอ่อนตัวและติดอยู่ในเครื่องป้อนลวดได้ เพราะเมื่อโลหะได้รับความร้อนสูง สมบัติทางกล เช่น ความแข็งและความต้านทานแรงดึง จะลดลง ทำให้ลวดเสียรูปง่ายและเกิดปัญหาระหว่างการเชื่อม [4], [5], [18] สำหรับการเชื่อม GTAW ด้วยเทคนิคการอุ่นลวดถูกแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 กราฟเปรียบเทียบอัตราการเติมเนื้อโลหะต่อพลังงานการอาร์กในกระบวนการเชื่อม GTAW ระหว่างลวดที่ไม่ได้อุ่นลวดเทียบกับเทคนิคการอุ่นลวด [4], [5]

4.1 การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุมแบบอุ่นลวดด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ

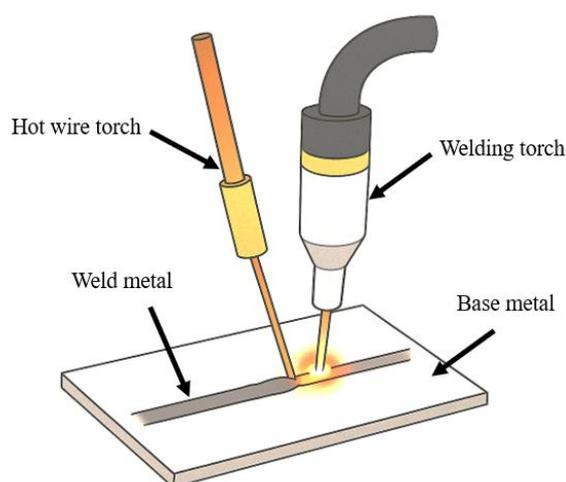
โดยทั่วไปในการเชื่อม GTAW แบบธรรมดาการป้อนลวดทำโดยตัวของช่างเชื่อม แต่ในการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติลวดเชื่อมจะถูกป้อนด้วยเครื่องป้อนลวดคล้ายกับเครื่องป้อนลวดในการเชื่อม GMAW สำหรับการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุมแบบอุ่นลวดด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Hot Wire Gas Tungsten Arc Welding; IHW-GTAW) ทำโดยติดตั้งอุปกรณ์อุ่นลวดหลังจากเครื่องป้อนลวด และก่อนบริเวณที่จะป้อนเข้าสู่แนวเชื่อม ช่วยลดเวลาในการละลายลวด ป้องกันความร้อนสะสมในชิ้นงาน และเพิ่มความแม่นยำในระบบอัตโนมัติ วิธีนี้ถูกใช้ที่ต้องการคุณภาพแนวเชื่อมสูง เช่น ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ท่อแรงดัน หรือเครื่องบิน อย่างไรก็ตาม การใช้งานระบบอุ่นลวดจำเป็นต้องควบคุมทั้งกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการอุ่นลวด และความเร็วในการป้อนลวดให้สัมพันธ์กัน หากใช้กระแสมากเกินไป แต่ป้อนลวดช้าเกินไป จะทำให้ลวดร้อนเกินความจำเป็น จนอ่อนตัวและติดอยู่ในเครื่องป้อนลวดได้ เพราะเมื่อโลหะได้รับความร้อนสูง สมบัติทางกล เช่น ความแข็งและความต้านทานแรงดึง จะลดลง ทำให้ลวดเสียรูปง่ายและเกิดปัญหาระหว่างการเชื่อม [4], [5], [18] สำหรับการเชื่อม GTAW ด้วยเทคนิคการอุ่นลวดถูกแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ระบบการอุ่นลวดเชื่อมในการเชื่อม GTAW [5]

4.2 การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมแบบอุ่นลวดด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ

ในการเชื่อม GMAW โดยทั่วไปลวดเชื่อมถูกป้อนจากเครื่องป้อนลวดผ่านหัวเชื่อม (Welding Torch) โดยตรง เพื่ออาร์กสร้างความร้อนหลอมละลายระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน อย่างไรก็ตามในเทคนิคการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมแบบอุ่นลวดด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Hot Wire Gas Metal Arc Welding; IHW-GMAW) จะมีการติดตั้งระบบหัวเชื่อมสำหรับลวดอุ่น (Hot Wire Torch) นี้ใช้แหล่งจ่ายไฟแยกจากเครื่องเชื่อมหลัก เพื่อควบคุมอุณหภูมิของลวดอย่างเหมาะสมก่อนเข้าสู่แนวเชื่อม โดยลวดอุ่นนี้ถูกอุ่นด้วยกระแสไฟฟ้าจากขดลวดเหนี่ยวนำส่งผลให้อุณหภูมิของลวดเพิ่มขึ้นและพร้อมที่จะละลายลงสู่บ่อหลอม การอุ่นลวดก่อนการเชื่อมมีข้อดีหลายประการ เช่น ช่วยเพิ่มอัตราการเติมเนื้อโลหะได้โดยไม่เพิ่มปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) ต่อเนื้อวัสดุ และยังสามารถลดจำนวนแนวเชื่อมที่ต้องทำในกระบวนการได้ แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้คือต้องใช้แหล่งจ่ายไฟแยกสำหรับการอุ่นลวด ส่งผลให้ระบบและการควบคุมมีความซับซ้อน อีกทั้งไม่เหมาะกับวัสดุลวดเชื่อมที่มีค่าต้านทานไฟฟ้าต่ำ อย่างเช่นลวดทองแดงหรืออะลูมิเนียมทำให้ต้องใช้กระแสมากขึ้นในการอุ่นลวด นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในด้านตำแหน่งการเชื่อมอีกด้วย ระบบการอุ่นลวดเชื่อมในการเชื่อม GMAW ถูกแสดงในรูปที่ 5 [19]



รูปที่ 5 ระบบการอุ่นลวดเชื่อมในการเชื่อม GMAW [20]

5. ผลของการเชื่อมแบบอุ่นลวดด้วยขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

การเชื่อมแบบอุ่นลวดด้วยขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนส่งผลโดยตรงต่อแนวเชื่อม เนื่องจากลดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ทำให้อัตราการเติมเนื้อโลหะ, โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลที่ได้เปลี่ยนไปจากแนวเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมที่ไม่อุ่นลวด

5.1 อัตราการเติมโลหะกับการเชื่อมแบบอุ่นลวดด้วยขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

ในกระบวนการเชื่อม GTAW แม้ว่าเป็นกระบวนการที่ให้แนวเชื่อมที่มีคุณภาพสูง แต่ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญคืออัตราการเติมเนื้อโลหะที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากช่างเชื่อมต้องป้อนลวดเชื่อมลงมาจากด้วยตนเอง ซึ่งปัญหานี้ได้รับการแก้ไขโดยการนำเครื่องป้อนลวดมาประยุกต์ใช้กับการเชื่อม GTAW ทำให้การเติมลวดเร็วขึ้น แต่เนื่องจากลวดเชื่อมที่อุณหภูมิห้องมีความแตกต่างกับอุณหภูมิหลอมลวดที่สูงทำให้ลวดหลอมละลายได้ช้าลง จึงแก้ปัญหานี้โดยนำเครื่องอุ่นลวดเชื่อมมาใช้เพื่ออุ่นลวดก่อนการเชื่อม ช่วยให้การหลอมละลายของลวดเชื่อมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ช่วยเพิ่มอัตราการเติมเนื้อโลหะโดยไม่เพิ่มความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานต่อเนื้อโลหะงานมากเกินไป

ในกระบวนการเชื่อม IHW-GTAW ลวดเติมที่ถูกอุ่นให้ร้อนด้วยการป้อนกระแสเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำ โดย กระแสที่แยกต่างหากจากกระแสของเครื่องเชื่อม โดยการอุ่นลวดนี้ช่วยลดพลังงานที่อาร์กต้องใช้ในการหลอมลวด ส่งผลให้อัตราการเติมเนื้อเชื่อมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จากงานวิจัยของ Voigt et al. แสดงให้เห็นว่า การอุ่นลวดด้วย เทคนิคการเหนี่ยวนำความร้อน ช่วยเพิ่มอัตราการเติมเนื้อโลหะแนวเชื่อมได้ถึงร้อยละ 220 เมื่อเทียบกับการเชื่อม GTAW แบบไม่อุ่นลวดที่ใช้ตัวแปรเชื่อมเดียวกัน โดยไม่มีปัญหาเปลวอาร์กเบี่ยงเบน (Arc Blow) ที่มักเกิดในระบบอุ่น ลวดด้วยกระแสไฟฟ้าโดยตรง [18] ในลักษณะเดียวกันจากงานวิจัยของ Padmanaban et al. ได้รายงานว่าการเพิ่ม ค่ากระแสอุ่นลวดที่ซึ่งส่งผลต่ออุณหภูมิของลวดเชื่อม และความเร็วการป้อนลวดในกระบวนการ IHW-GTAW ส่งผลให้ เกิดลักษณะแนวเชื่อม (Bead) มีมวลแนวเชื่อมและขนาดของแอ่งบ่อหลอมที่มากขึ้น โดยไม่ส่งผลเสียต่อรูปทรงของ ลักษณะแนวเชื่อม หรือเกิดข้อบกพร่องในงานเชื่อม (Defect) จึงแสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้สามารถใช้ควบคุมคุณภาพเชิง โลหะวิทยาของแนวเชื่อม พร้อมเพิ่มความสามารถในการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ [21]

สำหรับกระบวนการ IHW-GMAW ที่มีอัตราการเติมเนื้อโลหะที่สูงอยู่แล้ว ในการประยุกต์ใช้การอุ่นลวดจะ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพอัตราการเติมเนื้อโลหะให้ดียิ่งขึ้น จากงานวิจัยของ Marumoto et al. รายงานว่า เมื่อใช้กระแส อาร์ก 350–500 แอมแปร์ ที่ความเร็วการเชื่อม 0.3–0.7 เมตรต่อนาที และความเร็วป้อนลวดร้อน 10 เมตรต่อนาที สามารถลดจำนวนแนวเชื่อม (Pass) ที่ใช้เชื่อมแผ่นเหล็กหนา 19 มิลลิเมตร จากเดิม 8 แนวเหลือเพียง 6 แนว พร้อมทั้งลดพลังงานสะสมรวมต่อชิ้นงานได้มากกว่าการเชื่อมด้วยเทคนิค Tandem GMAW อย่างชัดเจน [20] นอกจากนี้ จากงานวิจัยของ Magadum et al. ยังพบว่าในกระบวนการ IHW-GTAW อัตราการเติมเนื้อโลหะเชื่อมสามารถเพิ่มขึ้น ถึง 3–5 เท่า เมื่อเทียบกับการเชื่อมที่ไม่ได้อุ่นลวด และมีค่าใกล้เคียงกับกระบวนการ GMAW โดยที่ความเร็วการเชื่อม สามารถเพิ่มขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญโดยไม่ส่งผลต่อรูปร่างของแนวเชื่อม หรือการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์ [5]

5.2 โครงสร้างจุลภาคกับการเชื่อมแบบอุ่นลวดด้วยขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

กระบวนการเชื่อมแบบ GTAW หรือ GMAW ร่วมกับการอุ่นลวด ได้รับการพัฒนาเพื่อเชื่อมวัสดุหนาและ ชิ้นงานที่ต้องการคุณภาพแนวเชื่อมสูง โดยหนึ่งในสมบัติสำคัญของกระบวนการนี้คือสามารถควบคุมโครงสร้างจุลภาค ของแนวเชื่อม (Weld Metal) และบริเวณผลกระทบจากความร้อน (Heat-Affected Zone: HAZ) ได้อย่างมี ประสิทธิภาพ ในกระบวนการ IHW-GTAW ส่งผลให้ใช้พลังงานในการอาร์กน้อยลงเมื่อเทียบกับการเชื่อมที่ไม่ได้อุ่น ลวด จึงส่งผลให้ความร้อนที่เข้าสู่แนวเชื่อมลดลง ทำให้ HAZ มีลักษณะที่แคบลง อีกทั้งลดความเสี่ยงของการโตของ เกรนขนาดใหญ่ในบริเวณรอยต่อ

จากงานวิจัยของ Marumoto et al. พบว่า กระบวนการเชื่อม IHW-GMAW สามารถลดขนาดเกรนบริเวณ ขอบเขตหลอมละลาย (Fusion Boundary) ได้อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการ GMAW ด้วยเทคนิค Tandem GMAW พบว่าขนาดเกรนลดลงจากประมาณ 500 ไมโครเมตร เหลือเพียง 100 ไมโครเมตร ภายใต้ ค่ากระแสเชื่อม 350–500 แอมแปร์ และความเร็วเดินแนวเชื่อม 0.3–0.7 เมตรต่อนาที ในการใช้การอุ่นลวดก่อนการ เชื่อมจะลดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิลวดเชื่อมกับอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการหลอมจึงทำให้ค่าความร้อนที่เข้าสู่ ชิ้นงานลดลง ส่งผลให้อัตราการเย็นตัว (Cooling Rate) เร็วขึ้น ทำให้เกรนมีความละเอียดมากขึ้น อีกทั้งเกรนที่ ละเอียดมากขึ้นยังส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงที่มากขึ้น [20]

นอกจากนี้ ในการศึกษาการเชื่อมพอกผิวโลหะ (Cladding) ในโลหะผสม Inconel 625 ลงบนโลหะฐานที่เป็น วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม 347 โดยใช้กระบวนการ IHW-GTAW ยังพบว่า การใช้กระแสหลักที่ต่ำประมาณ 60–100 แอมแปร์ ร่วมกับการอุ่นลวดช่วยลดการผสมระหว่างโลหะเติมและโลหะฐาน (Dilution) และลดความเสี่ยงของการ แตกร้าวใน HAZ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของชั้นเชื่อมพอกผิวโลหะ มีความสม่ำเสมอและ ลดความเครียดสะสมบริเวณขอบรอยเชื่อม [22]

5.3 สมบัติทางกลกับการเชื่อมแบบอุ่นลดด้วยขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

การเชื่อมด้วยเทคนิคการอุ่นลดเป็นเทคนิคที่ได้รับการพัฒนาเพื่อลดข้อจำกัดของการเชื่อมแบบดั้งเดิม โดยเฉพาะในด้านประสิทธิภาพการเชื่อมและการควบคุมคุณภาพแนวเชื่อม ทั้งนี้เทคนิคดังกล่าวได้พิสูจน์แล้วว่าสามารถส่งผลต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม ได้อย่างมีนัยสำคัญ การเชื่อมด้วยเทคนิคการอุ่นลดช่วยลดความร้อนที่ส่งเข้าสู่เนื้อวัสดุฐาน ซึ่งส่งผลต่อการลดการขยายตัวของเกรน และการลดการสะสมความเครียดภายในงาน ทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีความแข็งแรงและความเหนียวสูงขึ้น ตัวอย่างเช่น ในงานของ Marumoto et al. พบว่าแนวเชื่อมที่ได้จาก IHW-GMAW มีความแข็งแรงสูงกว่าแนวเชื่อมจากกระบวนการ Tandem GMAW อย่างชัดเจน ภายใต้เงื่อนไขที่มี ค่าความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานที่ต่ำกว่าและจำนวนแนวเชื่อมในการเชื่อมน้อยกว่า [20]

จากการศึกษาของ Padmanaban et al. ในการเชื่อมท่อวัสดุสแตนเลสเกรด 304H ด้วยกระบวนการ IHW-GTAW แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มกระแสไฟในขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน (Hot Wire Current) และความเร็วในการป้อนลวด (Wire Feed Rate) ช่วยเพิ่มน้ำหนักของเนื้อเชื่อมและส่งผลให้ลักษณะของแนวเชื่อมมีลักษณะทางเรขาคณิตที่ดีขึ้น เช่น ความกว้าง ความลึกของการแทรกซึม และมุมปลายรอยเชื่อม (Toe Angle) ซึ่งทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงและความสามารถในการรับแรงดึงของแนวเชื่อมโดยตรง [21]

นอกจากนี้ ในการศึกษาของ Pai et al. ซึ่งเปรียบเทียบความแข็งแรงต่อแรงกระแทก (Impact Strength) ระหว่างแนวเชื่อมที่ได้จากลวดเชื่อมที่ไม่อุ่นและลวดที่อุ่น ในการเชื่อม GTAW พบว่าแนวเชื่อมแบบอุ่นลด จะมีค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกที่ต่ำกว่าในวัสดุบางประเภท เช่น 9Cr-1Mo steel แต่กลับมีข้อดีในด้านรูปร่างของแนวเชื่อมที่สม่ำเสมอ และลดการเกิดรูพรุน (Porosity) ได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการอุ่นลดช่วยกำจัดสิ่งปนเปื้อน เช่น ความชื้น ให้ระเหยออกจากผิวลวดก่อนหลอมลงสู่บ่อหลอม ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของรูพรุนในแนวเชื่อม [23] สำหรับการเชื่อมพอกผิวโลหะในโลหะ Inconel 625 บนสแตนเลส 347 โดยใช้กระบวนการ IHW-GTAW พบว่า การควบคุมกระแสไฟให้ต่ำร่วมกับใช้การอุ่นลดสามารถลดการผสมระหว่างโลหะเติมและโลหะฐาน และลดความเสี่ยงของการแตกร้าวในบริเวณ HAZ ได้ ซึ่งช่วยคงไว้ซึ่งความเหนียวและความแข็งแรงของโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมได้ดี [22]

5.4 ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในขดลวดกับการเชื่อมแบบอุ่นลดด้วยขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

การอุ่นลดในกระบวนการเชื่อม สามารถทำได้โดยวิธีการให้ความร้อนแบบต่าง ๆ เช่น การให้ความร้อนด้วยความต้านทานไฟฟ้า (Resistance Heating) และ การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction Heating) โดยเฉพาะวิธีหลังนี้มีข้อได้เปรียบที่ชัดเจนในแง่ของความเสถียรของอาร์กและคุณภาพของแนวเชื่อม เนื่องจากไม่จำเป็นต้องให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดโดยตรง จึงสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากสนามแม่เหล็กซึ่งอาจส่งผลต่อเสถียรภาพของอาร์กเชื่อม

จากงานวิจัยของ Voigt et al. ได้มีการออกแบบระบบ IHW-GTAW โดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำกระแสสลับเพื่ออุ่นลดโลหะก่อนเข้าบ่อหลอม พบว่า การใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำอย่างเหมาะสม (ไม่เกิน 10–20 มิลลิเทสลา) สามารถเพิ่มอุณหภูมิลวดได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ลดเสถียรภาพของการอาร์กขณะเชื่อม อีกทั้งยังช่วยเพิ่มอัตราการเติมเนื้อโลหะเมื่อเทียบกับกระบวนการเชื่อมที่ไม่ได้อุ่นลดภายใต้ตัวแปรเดียวกัน ในขณะที่การอุ่นลดด้วยความต้านทานไฟฟ้า (Resistance Heating) มีข้อดีในเรื่องของการควบคุมง่ายและต้นทุนต่ำ แต่ส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นจากกระแสไฟฟ้า (Arc Blow) ซึ่งทำให้เปลวของอาร์กเบี่ยงเบน หรือรูปร่างลักษณะแนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ ได้ โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้กระแสตรง (DC) ต่อเนื่อง [18] งานวิจัยของ Magadum et al. จึงเสนอให้ใช้กระแสสลับ (AC) หรือกระแสพัลส์แทน เพื่อสลับขั้วอย่างต่อเนื่อง ลดการสะสมสนามแม่เหล็ก และช่วยให้กระบวนการมีความเสถียรมากขึ้น [5]

6. สรุป

การใช้เทคนิคอุณหภูมิต่ำช่วยลดความเครียดจากการเชื่อมอาร์ก เช่น GTAW และ GMAW ช่วยให้การเชื่อมมีประสิทธิภาพดีขึ้นในหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นการเติมเนื้อโลหะที่เร็วขึ้น การควบคุมรูปร่างแนวเชื่อมให้สม่ำเสมอ หรือการลดปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน ซึ่งเกิดจากลวดที่ถูกอุณหภูมิกัดจุดหลอม ทำให้หลอมละลายได้ง่ายขึ้นและไม่ต้องพึ่งพาอาร์กมากเหมือนเดิม นอกจากนี้ ยังพบว่าโครงสร้างจุลภาคในแนวเชื่อมมีความละเอียดขึ้น ส่งผลให้แนวเชื่อมแข็งแรงขึ้นและลดโอกาสแตกร้าว โดยเฉพาะเมื่อต้องเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนา ก็สามารถลดจำนวนแนวเชื่อมลงได้ ช่วยประหยัดเวลาและต้นทุนได้ สำหรับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเหนี่ยวนำ หากออกแบบและควบคุมอย่างถูกต้องจะไม่ส่งผลต่อการอาร์ก และสามารถนำไปใช้กับระบบเชื่อมอัตโนมัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่หากควบคุมไม่เหมาะสม อาจเกิดอาร์กเบี่ยงเบนหรือแนวเชื่อมผิดรูปได้ ซึ่งต้องระมัดระวังในการใช้งานจริง เพื่อให้เห็นภาพชัดเจน บทความนี้ได้สรุปเปรียบเทียบระหว่างระบบเชื่อมแบบไม่อุณหภูมิต่ำและแบบอุณหภูมิต่ำไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการเชื่อม Cold Wire และ Hot Wire ในระบบ GTAW และ GMAW

	Cold Wire GTAW	Hot Wire GTAW	Cold Wire GMAW	Hot Wire GMAW
1. แหล่งความร้อน	อาร์กจาก เครื่องเชื่อม GTAW	อาร์กจาก เครื่องเชื่อม GTAW เสริมเครื่องอุณหภูมิต่ำ	อาร์กจาก เครื่องเชื่อม GMAW	อาร์กจาก เครื่องเชื่อม GMAW เสริมเครื่องอุณหภูมิต่ำ
2. จำนวนลวดเชื่อมที่ใช้	1 เส้น	1 เส้น	1 เส้น	2 เส้น
3. การป้อนลวด	ป้อนลวดด้วยมือ หรืออัตโนมัติ	ป้อนลวดที่ ถูกอุณหภูมิต่ำ จากอุปกรณ์แยก	ป้อนลวดอัตโนมัติ จากเครื่องเชื่อม	ป้อนลวดอัตโนมัติ จากเครื่องเชื่อม เสริมป้อนลวดที่ ถูกอุณหภูมิต่ำ จากอุปกรณ์แยก
4. ลักษณะลวด	ลวดเติมไม่ถูกอุณหภูมิต่ำ	ลวดเติมถูกอุณหภูมิต่ำ	ลวดเชื่อมไม่ถูกอุณหภูมิต่ำ	ลวดเชื่อมไม่ถูกอุณหภูมิต่ำ เสริมลวดเติมที่ถูก อุณหภูมิต่ำจากเครื่องป้อน ลวดอัตโนมัติ (ผ่านระบบแยก)
5. อัตราเติมเนื้อโลหะ	ต่ำ	ปานกลาง	สูง	สูงมาก
6. พลังงานในการอาร์ก	ต่ำ	ต่ำมาก	ปานกลางถึงสูง	ปานกลาง
7. คุณภาพแนวเชื่อม	สูง	สูงและสม่ำเสมอ	ปานกลาง	ปานกลางถึงสูง และสม่ำเสมอ
8. ความเสี่ยงต่อรูพรุน และการแตกร้าว	ต่ำ	ต่ำมาก	ปานกลาง	ปานกลางถึงต่ำ

	Cold Wire	Hot Wire	Cold Wire	Hot Wire
	GTAW	GTAW	GMAW	GMAW
9. ขนาดเกรน	ละเอียด	ละเอียดมาก	ปานกลาง	ปานกลางถึง ละเอียด
10. ความเร็วในการเชื่อม	ต่ำ	ปานกลาง	สูง	สูงมาก
11. การประยุกต์ใช้งาน	งานที่ต้องการ ความละเอียด	งานพอกผิว	งานโครงสร้าง ทั่วไป	งานโครงสร้างที่มี ความหนามาก

กล่าวโดยสรุป เทคนิคการอุ่นลวดก่อนการเชื่อมด้วยขดลวดเหนียวนำความร้อนเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงในการเพิ่มคุณภาพและประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อม เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานเชื่อมระดับอุตสาหกรรมที่ต้องการความแม่นยำ ความแข็งแรง และความเร็วในกระบวนการผลิต

7. ข้อเสนอแนะ

การนำเทคนิคการอุ่นลวดก่อนการเชื่อมมาประยุกต์ใช้ในการเชื่อม GTAW หรือ GMAW มีข้อดีหลายอย่าง แต่ก็ยังมีข้อจำกัดคือเครื่องอุ่นลวดต้องใช้แหล่งจ่ายไฟแยกจากเครื่องเชื่อมหลัก อีกทั้งระบบมีความซับซ้อนมากกว่าการเชื่อมปกติ รวมไปถึงไม่เหมาะกับลวดเชื่อมที่มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำเนื่องจากต้องใช้กระแสไฟฟ้าเหนียวนำที่สูงกว่าปกติ นอกจากนี้ขณะเชื่อมต้องพิจารณาเลือกความเร็วป้อนลวดและกระแสไฟฟ้าเหนียวนำที่ใช้สำหรับสร้างความร้อนแก่ลวดเชื่อม เนื่องจากหากตัวแปรไม่สัมพันธ์กัน เช่นใช้ความเร็วป้อนลวดต่ำ แต่ใช้กระแสเหนียวนำสูงอาจส่งผลให้ลวดเชื่อมมีอุณหภูมิสูงเกินไปจนทำให้ลวดเชื่อมติดกับอุปกรณ์อุ่นลวดได้ เนื่องจากโลหะเมื่อมีอุณหภูมิสูงจะทำให้สมบัติของโลหะมีความอ่อนตัวจากความร้อน

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณภาคีวิศวกรรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนองค์ความรู้และทรัพยากรทางวิชาการซึ่งมีส่วนสำคัญต่อบทความวิชาการในครั้งนี้ อีกทั้งผู้เขียนขอขอบพระคุณมูลนิธิโทรเพื่อการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 28 ซึ่งผลจากโครงการดังกล่าวมีส่วนช่วยเกื้อหนุนต่อการสังเคราะห์องค์ความรู้และการจัดทำบทความวิจัยฉบับนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. V. S. Kumar, S. Gejendhiran, and M. Prasath, "Comparative investigation of mechanical properties in GMAW/GTAW for various shielding gas compositions," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 29, no. 8, pp. 996–1003, Jul. 2014, doi: 10.1080/10426914.2014.901527.
- [2] T. Chanasavasook, P. Lertvijitpun, and T. Thublaor, "Effect of GTAW and GMAW-STT processes on mechanical properties and microstructure of dissimilar pipe joining between ASTM A106 Gr.B and ASTM A312 TP316/316L in 6G position," *Materials Science Forum*, vol. 1141, pp. 3–10,

- Dec. 2024, doi: 10.4028/p-dS5OcF.
- [3] R. Singh, *Arc Welding Processes Handbook*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2021, pp. 115–296, doi: 10.1002/9781119819080.
- [4] Y. Tawfik, Ed. *Welding Handbook, Vol. 2: Welding Processes, Part 1*. Miami, FL: American Welding Society, 2004, pp. 103–203. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/500941641/Welding-Handbook-Ninth-Edition-Volume-2>
- [5] C. Magadum, S. Ponnusamy, M. Muthukrishnan, and B. Nair, “Developments and improvements using hot wire gas tungsten arc welding – A review,” *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 16, no. 2, Apr. 2023, Art. no. 5965, doi: 10.14416/j.asep.2022.05.008.
- [6] S. Egerland, J. Zimmer, R. Brunmaier, R. Nussbaumer, G. Posch, and B. Rutzinger, “Advanced gas tungsten arc weld surfacing current status and application,” *Soldagem & Inspeção*, vol. 20, no. 3, pp. 300–314, Oct. 2015, doi: 10.1590/0104-9224/SI2003.05.
- [7] A. K. Yadav, M. K. Agrawal, K. K. Saxena, and B. Yelamsetti, “Effect of GTAW process parameters on weld characteristics and microstructural studies of dissimilar welded joints of AA5083 and AA6082: Optimization technique,” *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, vol. 18, no. 3, pp. 1151–1160, Feb. 2023, doi: 10.1007/s12008-023-01230-x.
- [8] P. Kah, R. Suoranta, and J. Martikainen, “Advanced gas metal arc welding processes,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 67, no. 1, pp. 655–674, Jul. 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4513-5.
- [9] I. A. Ibrahim, S. A. Mohamat, A. Amir, and A. Ghalib, “The effect of gas metal arc welding (GMAW) processes on different welding parameters,” *Procedia Engineering*, vol. 41, pp. 1502–1506, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.342.
- [10] H. Du, J. Li, and Y. Qu, “Mathematical modeling of eddy-current loss for a new induction heating device,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, no. 6, pp. 1–7, Jun. 2014, doi: 10.1155/2014/923745.
- [11] A. O. Glebov, S. V. Karpov, S. V. Karpushkin, and E. N. Malygin, “Modeling of three-dimensional fields of eddy currents during induction heating of process equipment,” *Russian Electrical Engineering*, vol. 89, no. 3, pp. 204–209, Jun. 2018, doi: 10.3103/S1068371218030094.
- [12] N. P. Cheremisinoff, *Electrotechnology: Industrial and Environmental Applications*. Westwood, NJ: Noyes Publications, 1996, pp. 1–21. [Online]. Available: <https://books.google.co.th/books?id=NRrxX0vz04kC&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
- [13] P. Vishnuram, G. Ramachandiran, T. Sudhakar Babu, and B. Nastasi, “Induction heating in domestic cooking and industrial melting applications: A systematic review on modelling, converter topologies and control schemes,” *Energies*, vol. 14, no. 20, Oct. 2021, Art. no. 6634, doi: 10.3390/en14206634.

- [14] V. S. Nemkov and R. C. Goldstein, "Design principle for induction heating and hardening," in *Handbook of Metallurgical Process Design*, G. E. Totten, K. Funatani, and L. Xie, Eds., NY: Marcel Dekker, 2004, pp. 591–640. [Online]. Available: <https://vdoc.pub/documents/handbook-of-metallurgical-process-design-4a5p7kj0tm90>
- [15] M. Patil, R. K. Choubey, and P. K. Jain, "Influence of coil shapes on temperature distribution in induction heating process," *Materials Today: Proceedings*, vol. 72, pp. 3029–3035, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.08.376.
- [16] J. Li, P. Zhang, J. Hu, and Y. Zhang, "Study of the synergistic effect of induction heating parameters on heating efficiency using Taguchi method and response surface method," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 1, Dec. 2022, Art. no. 555, doi: 10.3390/app13010555.
- [17] N. Barka, A. E. Ouafi, P. Bocher, and J. Brousseau, "Effects of material properties for non-equilibrium conditions in induction heating process," *Advanced Materials Research*, vol. 664, pp. 496–503, Feb. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.664.496.
- [18] A. L. Voigt, T. V. da Cunha, and C. E. Niño, "Conception, implementation and evaluation of induction wire heating system applied to hot wire GTAW (IHW-GTAW)," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 281, Jul. 2020, Art. no. 116615, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116615.
- [19] N. Suwannatee and M. Yamamoto, "Single-Pass process of square butt joints without edge preparation using hot-wire gas metal arc welding," *Metals*, vol. 13, no. 6, May 2023, Art. no. 1014, doi:10.3390/met13061014.
- [20] K. Marumoto, A. Fujinaga, T. Takahashi, H. Yamamoto, and M. Yamamoto, "Selection of welding conditions for achieving both a high efficiency and low heat input for hot-wire gas metal arc welding," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 8, no. 2, Apr. 2024, Art. no. 82, doi: 10.3390/jmmp8020082.
- [21] A. Padmanaban, B. Neelakandan, and D. Kandasamy, "A study on process characteristics and performance of hot wire gas tungsten arc welding process for high temperature materials," *Materials Research*, vol. 20, no. 1, pp. 76–87, Nov. 2016, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2016-0321.
- [22] B. Silwal, J. Walker, and D. West, "Hot-wire GTAW cladding: Inconel 625 on 347 stainless steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, pp. 3839–3848, Mar. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03448-0.
- [23] A. Pai, I. Sogalad, S. Basavarajappa, and P. Kumar "Assessment of impact strength of welds produced by cold wire and hot wire gas tungsten arc welding (GTAW) processes," *Materials Today: Proceedings*, vol. 24, pp. 983–994, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.411.