

การยอมรับการเชื่อมของเหล็กใช้งานอุณหภูมิไครโอเจนิก

Weldability of Cryogenic Steels

มนูญ เลิศวิจิตรพันธุ์

1. บทนำ

อุณหภูมิไครโอเจนิกจะหมายถึงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 0°C (273°K) จนถึงอุณหภูมิต่ำมากคือ -273°C (0°K) ที่อุณหภูมิต่ำมากนี้ถือว่าเป็นอุณหภูมิที่ไม่มีความร้อนหลงเหลืออยู่ อุณหภูมิไครโอเจนิกจะเกิดขึ้นตามความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิตามกฎของก๊าซ จะเกิดขึ้นในขบวนการผลิต-เก็บ-บรรจุ-ขนส่งก๊าซไครโอเจนิก เช่น ก๊าซธรรมชาติ โพรเพน มีเทน แอมโมเนีย ไนโตรเจน ไฮโดรเจน อุณหภูมิไครโอเจนิกจะมีใช้งานทั้งในทางการแพทย์, การผลิตและขนส่งในอุตสาหกรรมเปโตรเคมี, การผลิตอาหารแช่แข็งการใช้งานด้านอวกาศและการผลิตสารตัวนำยิ่งยวด

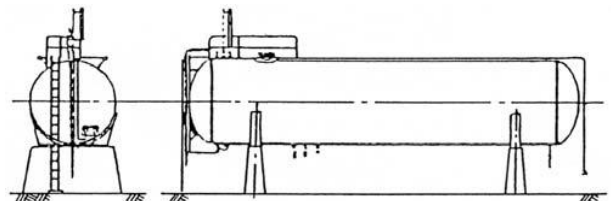
2. การจัดเก็บ-บรรจุ-ขนส่งก๊าซไครโอเจนิก

ในสภาพแวดล้อมปกติก๊าซไครโอเจนิกจะถูกบรรจุในภาชนะปิด จะมีอยู่ 2 ลักษณะคือการ (1) ทำให้ปริมาตรลดลงแต่มีความดันสูง และ (2) การทำให้อยู่ในสภาพก๊าซเหลว มีความดันสูง-อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่อก๊าซเหลวถูกนำมาใช้งานจะต้องทำให้เกิดการระเหยเป็นก๊าซก่อน ในขณะที่ระเหยเป็นก๊าซความดันจะลดลงและจะดูดความร้อนรอบตัวเนื่องจากการระเหย ทำให้บริเวณแวดล้อมมีอุณหภูมิลดลงจนอาจต่ำกว่า -270°C (3°K) ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำมาก

การขนส่งและจัดเก็บก๊าซไครโอเจนิกชนิดต่างๆ ได้เพิ่มขึ้นมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1900 การจัดเก็บ-บรรจุในสภาพของเหลวจะสามารถลดปริมาณการจัดเก็บจากสภาพก๊าซลงได้มาก (300 ถึง 900 เท่า) ขึ้นอยู่กับชนิดของสารไครโอเจนิกนั้นๆ

3. สมบัติที่สำคัญของภาชนะบรรจุสารไครโอเจนิก

ภาชนะบรรจุสารไครโอเจนิก รวมถึงระบบท่อขนส่งสารไครโอเจนิกต้องมีคุณสมบัติหลายประการเพื่อให้สามารถรองรับได้ทั้งความเค้น ความเครียดที่เกิดจากความดันและอุณหภูมิที่แปรเปลี่ยน และต้องมีคุณสมบัติทางกลอื่นที่ตีพอภายใต้สภาวะใช้งานดังนี้



รูปที่ 1 ถังเก็บ-บรรจุ LPG เหลวขนาดเล็กทรงนอนในสภาวะแวดล้อมปกติ-ความดันสูง สามารถเก็บ-บรรจุได้หลายสิบตัน, ส่วนใหญ่ติดตั้งไว้เหนือระดับพื้นดิน

3.1 ต้องมีความแข็งแรง (Strength) ที่เพียงพอต่อภาระความเค้นที่เกิดจากน้ำหนักและแรงดันที่เกิดขึ้น

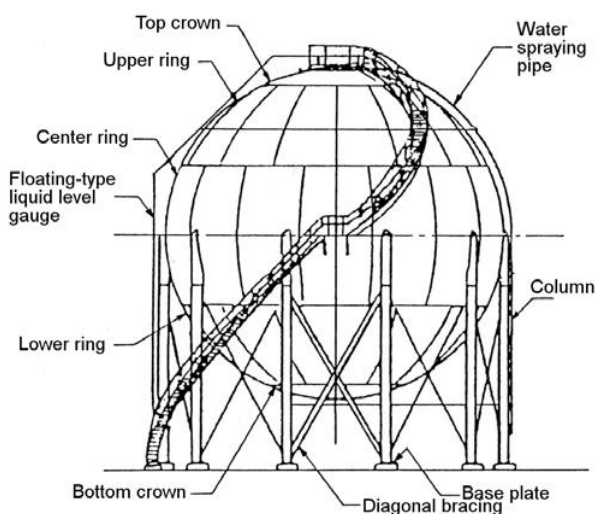
3.2 ต้องมีความเหนียวแกร่ง (Toughness) ที่เพียงพอเนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำวัสดุบางชนิดจะยิ่งเปราะมากขึ้นเช่นเหล็กบางชนิด ทำให้เกิดการแตกร้าวได้ง่าย

3.3 ต้องเข้ากันได้กับสภาพแวดล้อม (Compatibility) ภายนอกที่ความดันและอุณหภูมิปกติทั้งที่ภายในภาชนะมีความดันสูงและอาจมีอุณหภูมิต่ำมาก

3.4 ต้องมีความเสถียรทั้งทางโครงสร้างและทางพิคขนาด ทั้งที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิและความดันที่แปรเปลี่ยนไปอย่าง ทันทีทันใดจากอุณหภูมิต่ำสู่อุณหภูมิแวดล้อมปกติในขณะที่ใช้งาน หรือจากสภาพไร้ความดันภายในสู่สภาพความดันสูงที่ อุณหภูมิปกติ จนถึงอุณหภูมิต่ำมาก

3.5 ค่าการนำความร้อนของเหล็กโคร โยนิคต้องมากพอที่จะทำให้ผิวหน้าด้านสัมผัสก๊าซโคร โยนิคกับด้านที่มีได้ สัมผัสมีอุณหภูมิที่เท่ากันเพื่อให้การขยายตัวทั่วพื้น ผิวภาคตัดมี ค่าเท่ากัน ทำให้ภาชนะมีอายุใช้งานยาวนาน

3.6 ต้องสามารถขึ้นรูปและเชื่อมประกอบได้ง่าย มีค่า การยอมรับการเชื่อมสูง

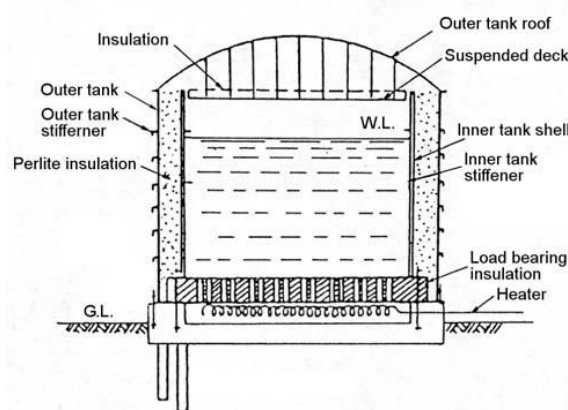


รูปที่ 2 ถังบรรจุ LPG เหลวทรงกลมขนาดใหญ่มีได้หุ้มฉนวน ในสภาพอุณหภูมิแวดล้อมปกติภายในถังมีความดัน สูงอุณหภูมิภายในใกล้เคียงกับภายนอกถัง

4. การยอมรับการเชื่อม

คือตัววัดคุณภาพที่เกิดกับชิ้นงานที่ถูกเชื่อม ตัวแปรที่มีผลต่อ การยอมรับการเชื่อมจะประกอบด้วย (1) ชนิดของวัสดุ (2) สภาพแวดล้อมและอุปกรณ์ช่วยต่างๆในการเชื่อม (3) ความ ปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานเชื่อม หากชิ้นงานที่ถูกเชื่อมมีคุณภาพ การเชื่อมดี มีคุณสมบัติทางกลดีเช่นมีความแข็งแรงสูง ไม่มีรอย ก่อวิบัติ (Defects) รูปร่างรอยเชื่อมสมส่วน สวยงามชิ้นงานนั้น

ก็มีการยอมรับการเชื่อมสูง หากเชื่อมแล้วชิ้นงานนั้นมีคุณภาพ ทางกลต่ำ เชื่อมได้ยาก รอยเชื่อมไม่ได้สัดส่วน ผู้ทำการเชื่อม อาจต้องอยู่ในสภาวะเสี่ยงขณะทำการเชื่อม ชิ้นงานนั้นก็มีการ ยอมรับการเชื่อมต่ำ

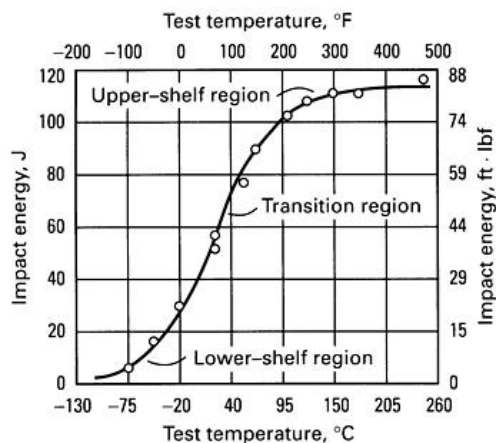


รูปที่ 3 ถังบรรจุ LPG เหลวทรงตั้งขนาดใหญ่หุ้มฉนวน ภายใน ถังมีภาพอุณหภูมิต่ำ-ความดันต่ำซึ่งสามารถสร้างไว้ เหนือพื้นดิน เหนือพื้นดินบางส่วน หรือลงใต้ดิน ทั้งหมด

ชิ้นงานที่ทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน มีรูปร่างลักษณะเดียวกัน หากทำการเชื่อมในโรงงานที่มีหลังคา กันแดดฝน มีเครื่องมือ พร้อม มีเครื่องมือช่วยจับยึดชิ้นงานพร้อม มีเครื่องจักรกลช่วย ยก-เคลื่อนย้ายชิ้นส่วนขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก งานที่ทำการ เชื่อมในโรงงานย่อมมีการยอมรับการเชื่อมสูงกว่าชิ้นงานที่ทำ การเชื่อมในภาคสนามที่มีความพร้อมน้อยกว่า

5. เหล็กที่ใช้ในงานอุณหภูมิโครโยนิค

เหล็กกล้าคาร์บอนจะมีลักษณะด้อยคือ ค่าความเหนียวแรงง หรือความสามารถดูดกลืนพลังงานที่ตีกระทบ (Impact energy) ลดลงตามอุณหภูมิ นั่นคือ ที่อุณหภูมิต่ำลงเหล็กจะเปราะมาก ขึ้น (เช่นกรณีวัดของเรือ ไททานิกที่ชนภูเขาน้ำแข็งแล้วเรือแตก จนล่มลง) ทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนไม่สามารถนำมาใช้ทำ ภาชนะบรรจุหรือท่อส่งก๊าซโครโยนิคได้เพราะจะเกิดการ หายนะจากการแตกร้าวอย่างที่ไม่คาดคิดได้เมื่ออยู่ภายใต้ อุณหภูมิต่ำบวกกับความเค้นสูง



รูปที่ 4 สมบัติการดูดกลืนพลังงานหรือค่าความเหนียวแรงงของเหล็กที่แปรตามระดับอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิต่ำเหล็กดูดกลืนพลังงานดีกระทบได้ต่ำจะมีค่าความเหนียวแรงงต่ำ มีความเปราะสูง

ในยุคแรกวัสดุหลายชนิดได้ถูกนำมาใช้ทำภาชนะบรรจุสารไครโอเจนิกแต่ที่มีคุณสมบัติโดดเด่นคือทองแดงเนื่องจากทองแดงยังคงมีคุณสมบัติทางกลที่ดีถึงแม้จะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิที่ต่ำมาก ในปัจจุบันอลูมิเนียมผสม เหล็กสเตนเลส และเหล็กผสมนิเกิล เหล็กปรับคุณสมบัติด้วยอลูมิเนียม (Al-killed steel) ได้ถูกนำมาใช้ที่อุณหภูมิที่ระดับต่าง ๆ มากขึ้นเนื่องจากทองแดงมีราคาแพง ความแข็งแรงต่ำกว่าเหล็กและการยอมรับการเชื่อมของทองแดงต่ำกว่าเหล็ก (เชื่อมได้ยากกว่าเหล็ก) มาก ในปัจจุบันเหล็กไครโอเจนิก หรือเหล็กผสมนิเกิลเกรดต่าง ๆ มักถูกเลือกใช้งานเสมอเนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ความเหนียวแรงงและการยอมรับการเชื่อมสูง สร้างได้ง่ายและราคาคู่มือต่ำกว่าโลหะอื่นที่อุณหภูมิที่ต่ำมาก (-273°C) โลหะที่มีโครงสร้างผลึกบีซีซี (Body Center Cubic: BCC) คุณสมบัติทางกลเช่นความเหนียวยืด (Ductility) ความเหนียวแรงง (Toughness) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่พึงปรารถนาจะลดลงมากแต่โลหะที่มีโครงสร้างผลึกเอฟซีซี (Face Center Cubic: FCC) จะยังคงคุณสมบัติความแข็งแรงและความเหนียวที่ด้อยกว่าสภาพแวดล้อมปกติเพียงเล็กน้อยทำให้เหมาะต่อการใช้งานในอุณหภูมิไครโอเจนิก เหล็กตามธรรมชาติจะมีโครงสร้างผลึกบีซีซีซึ่งไม่เหมาะต่อการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ เหล็กผสมนิเกิลจะมีโครงสร้างผลึกเป็นบีซีซีผสมเอฟซีซีอันเนื่องจากอิทธิพลของนิเกิล และมีคาร์ไบด์ละเอียดของธาตุเจือ

(alloy) เช่นทิตาเนียมคาร์ไบด์ โมลิบดีนัมคาร์ไบด์ โคัลัมเบียมคาร์ไบด์ วานาเดียมคาร์ไบด์ กระจายเสริมความแข็งแรงอยู่ในเมทริกซ์ของเหล็กผสมนิเกิลที่มีความเหนียวแรงงสูง จากการศึกษาวิเคราะห์ว่าเหล็กที่มีคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมต่อการใช้งานอุณหภูมิที่ต่ำตามต้องการจะต้องผ่านกระบวนการผลิตดังนี้

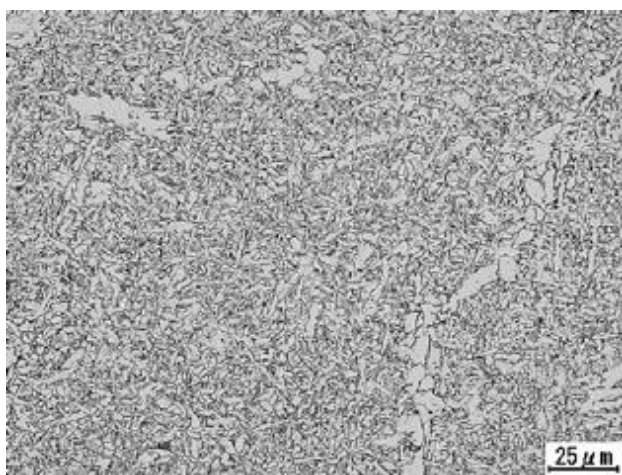
ตารางที่ 1 อุณหภูมิไอระเหยของก๊าซเหลวและวัสดุที่เหมาะสมต่อการทำภาชนะบรรจุเพื่อการขนส่งและใช้งาน

ชนิดของก๊าซ	อุณหภูมิระเหยเป็นไอ (°C)	ชนิดเหล็ก, โลหะที่ใช้ทำภาชนะบรรจุ
Ammonia	- 33.4	- เหล็กกล้าคาร์บอน
Propane (LPG)	- 42.1 ถึง - 45.5	- เหล็กเกรนละเอียด (Fine grain Al-killed steel)
Propylene	- 47.7	- เหล็ก 2.25% Ni
Carbon disulphide	- 50.2	
Hydrogen sulphide	- 59.5	- เหล็ก 3.5% Ni
Carbon dioxide	- 78.5	
Acetylene	- 84	
Ethane	- 88.4	
Ethylene (LEG)	- 103.8	- เหล็ก 5 - 9% Ni
Krypton	- 151	
Methane (LNG)	- 163	
Oxygen	- 182.9	
Argon	- 185.9	
Fluorine	- 188.1	- อลูมิเนียมอัลลอย
Nitrogen	- 195.8	
Neon	- 246.1	
Heavy hydrogen	- 249.6	
Hydrogen	- 252.8	
Helium	- 268.9	- เหล็กเกรนละเอียด 12% Ni
Absolute Zero	- 273.18	

5.1 มีความสะอาดสูง สารมลทินในเหล็กเช่น ฟอส ฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) ต้องอยู่ในปริมาณที่ต่ำมาก (P ~ 0.018%, S ~ 0.006%) P และ S ในเนื้อเหล็กหากมีมากจะทำให้เหล็กเสียความแข็งแรงและความเหนียว ทำให้เหล็กเปราะทั้งที่อุณหภูมิสูงและที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากสารประกอบของ P และ S มีจุดหลอมละลายต่ำกว่าเหล็กมาก เมื่ออยู่ในเหล็ก P และ S จะอยู่ใน

รูปของสารประกอบ FeP, FeS, ซึ่งมีจุดหลอมละลายประมาณ $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ในขณะที่เหล็กมีจุดหลอมละลายประมาณ 1450°C หรืออยู่ในรูปของสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกของ FeMnS ซึ่งแยกอยู่ตามชั้นรอยรืดของเหล็กไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับเหล็ก (Homogeneous) อย่างสมบูรณ์

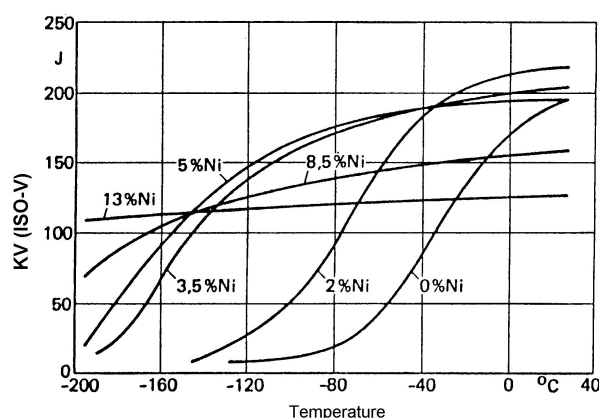
5.2 ต้องผ่านกระบวนการกำจัดออกซิเจนส่วนที่เหลืตกค้างจากการฟอก (Refine) ในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยการใช้อลูมิเนียมเป็นสารดีออกซิไดซ์เซอร์ (Deoxidation) อลูมิเนียมที่ใส่ลงในน้ำเหล็กภายหลังการฟอกเพื่อการปรับคุณสมบัติของเหล็ก จะเข้าร่วมตัวกับออกซิเจนในน้ำเหล็กทำให้เกิดเป็นอนุภาคของแข็งเล็กๆจำนวนมากของอลูมิเนียม ออกไซด์ (Al_2O_3) ล่องลอยอยู่ในน้ำเหล็ก (เนื่องจากอลูมิเนียมออกไซด์มีจุดหลอมละลายที่ 2200°C ซึ่งสูงกว่าเหล็กมาก) อนุภาคเล็กๆเหล่านี้จะกลายเป็นนิวเคลียสจำนวนมากเมื่อเหล็กเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวสู่ของแข็ง ทำให้เหล็กปราศจากฟองก๊าซของสารประกอบออกไซด์เช่นคาร์บอนมอนนอกไซด์ฝังในเนื้อเหล็ก มีสารมนทิลต่ำและมีเกรนละเอียด โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่จะเป็นเฟอร์ไรต์ละเอียด (Acicular ferrite) ซึ่งมีความแข็งแรงและความเหนียวสูง



รูปที่ 5 เหล็กปรับคุณสมบัติด้วยอลูมิเนียม (Al-killed steel) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E8018 รอยเชื่อมจะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์ละเอียด ตามขอบเกรนจะมีเฟอร์ไรต์หยาบข้าง

5.3 ผ่านกระบวนการผลิตที่ต้องควบคุมอุณหภูมิ อัตราการเย็นตัวและสัดส่วนการรีดอย่างเข้มงวด ด้วยการชุบแข็งและอบคืนไฟ (Quenching and Tempered: Q&T) ในระหว่างขั้นตอนการรีดขึ้นรูป

5.4 มีส่วนผสมของนิเกิล (Ni) และโลหะเจือ (Alloys) ที่เหมาะสมเช่น โมลิบดีนัม ทิตาเนียม วานาเดียม ทองแดง แมงกานีส ซิลิคอน คาร์บอน เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่มีความแข็งแรงของโครงสร้างพื้นเมทริก มีความเหนียวจากนิเกิลซึ่งเป็นโลหะที่ไม่รวมกับคาร์บอนเป็นโลหะคาร์ไบด์ หรือรวมกับไนโตรเจนเป็นโลหะไนไตรต์ ซึ่งมีสมบัติที่แข็ง แต่จะมีคาร์ไบด์ละเอียดจากโลหะเจือในปริมาณเล็กน้อย (Micro-alloyed) กระจายเสริมความแข็งแรงอยู่ทั่วเมทริก ด้วยปริมาณนิเกิลระหว่าง 1-9% จะช่วยให้เหล็กยังคงความเหนียวอยู่ตามปริมาณนิเกิลที่เพิ่มขึ้น หากต้องใช้งานที่อุณหภูมิใกล้ 0°K (-273°C) อาจต้องเพิ่มปริมาณนิเกิลขึ้นถึง 12% ปริมาณนิเกิลที่ผสมในเหล็กจะลดค่าความแข็งแรงของเหล็กลงเล็กน้อย (ตารางที่ 1 จะเป็นแนวทางการเลือกใช้เหล็กผสมนิเกิลในปริมาณ 1-12% ที่เหมาะสมต่อการใช้งานในอุณหภูมิต่างๆ) ทำให้เหล็กผสมนิเกิลที่อุณหภูมิต่ำมากนี้ ยังคงมีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กสแตนเลสและอลูมิเนียมทั้งยังคงความเหนียวแรงที่ดี มีการยอมรับการเชื่อมสูง



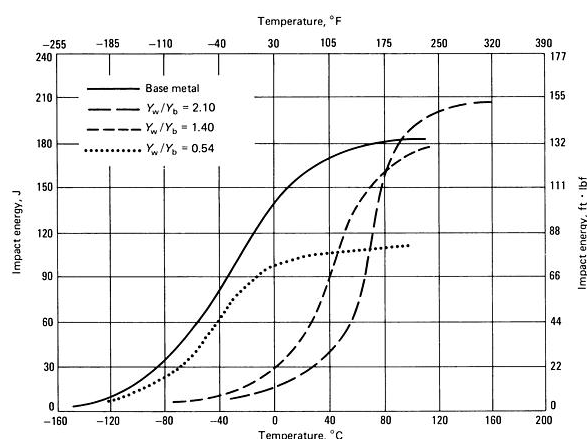
รูปที่ 6 ค่าความคงตัวของความเหนียวแรงของเหล็กที่อุณหภูมิแวดล้อมปกติถึงอุณหภูมิต่ำตามปริมาณนิเกิลที่ผสมในเหล็ก

6. กระบวนการเชื่อม (Welding Procedure)

กระบวนการเชื่อมเหล็กใช้งานอุณหภูมิต่ำถึงต่ำมากจะมีกระบวนการเชื่อมเช่นเดียวกับเหล็กผสมความแข็งแรงสูง (High Strength Low Alloy: HSLA Steel) ที่ใช้งานในโครงสร้างทั่วไปทั้งในเรื่องของการเตรียมรอยต่อ ใช้ลวดเชื่อมและฟลักระบบไฮโดรเจนต่ำ การอุ่นงาน (Pre-heat) ขั้นตอนการเชื่อม การอบงานภายหลังการเชื่อม (Post Weld Heat Treatment)

แนวเชื่อมที่ต้องการรอยเชื่อมคุณภาพสูง หากเชื่อมได้จากด้านเดียวมักเชื่อมแนวแรก (Root Pass) ด้วยการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas: TIG) หากเชื่อมได้ทั้งสองด้านของแผ่นงานมักเชื่อมด้านแรกให้เสร็จหรือมีรอยเชื่อมที่หนาพอ แล้วเจียร์แนวแรกที่ด้านตรงข้าม บางครั้งอาจทดสอบด้วยอนุภาคแม่เหล็ก (Magnetic Particle Test: MT) หรือการทดสอบด้วยสารแทรกซึม (Penetrant Testing: PT) ก่อนเพื่อให้มั่นใจว่าจะไม่เกิดรอยแตกร้าวตักค้างอยู่ในแนวแรกของรอยเชื่อม (โดยทั่วไปโลหะที่มีโครงสร้างผลึกเอพซีซีจะไม่มีสมบัติเป็นแม่เหล็ก นิเกิลอยู่ในคอลัมเดียวกันกับเหล็กและโคบอลต์และเป็นหนึ่งในห้าของสารเฟอร์โรแมกเนติก จึงมีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่ดี) ถึงแม้จะมีโครงสร้างผลึกเป็นเอพซีซีเกิดผสมอยู่ในโลหะงาน แล้วจึงทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอื่นที่ได้เลือกไว้จนเสร็จ

สิ่งสำคัญในกระบวนการเชื่อมคือการเลือกลวดเชื่อมให้เข้ากับวัสดุงาน โดยทั่วไปโลหะลวดเชื่อมจะเป็นโลหะชนิดเดียวกันกับโลหะงาน ในการเชื่อมโลหะใช้งานที่อุณหภูมิต่ำถึงต่ำมากหากต้องการความเหนียวเป็นคุณสมบัติหลักจะเลือกลวดเชื่อมที่ให้โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเป็นโครงสร้างออสเตไนต์ (เช่นเลือกใช้ลวดเชื่อม E 309L) ซึ่งจะมีค่าความแข็งแรงต่ำกว่าโลหะงาน แต่หากต้องการให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงแต่ยอมให้ด้อยในเรื่องความเหนียวของรอยเชื่อมบ้าง ก็จะเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เชื่อมแล้วให้โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเป็นเฟอร์ริติก (เช่นเลือกใช้ลวดเชื่อม E 7018) ดังนั้นวิศวกรการเชื่อมจึงต้องวินิจฉัยการใช้งานก่อนการตัดสินใจเลือกใช้ลวดเชื่อมประกอบการออกแบบกระบวนการเชื่อม



รูปที่ 7 สัดส่วนค่าความเค้นครากต่อความเหนียวแรงที่อุณหภูมิต่างๆอันเป็นผลจากการเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีค่าความเค้นครากระดับต่างๆ

สถาบันการเชื่อมสากล (International Welding Institute: IIW) ได้จัดทำและเผยแพร่มาตรฐานเพื่อเป็นแนวทางในการปฏิบัติการเชื่อมเหล็กใช้งานอุณหภูมิต่ำเช่น

“Guide to the Welding and Weldability of C-Mn and C-Mn micro-alloyed Steel” – IIW-382-71

“Guide to the Welding and Weldability of Quenched and Tempered C-Mn and Micro-alloyed Steels”

-- Doc. IX-1036-77

“Guide to the Welding and Weldability of Pearlite-reduced and Pearlite-free Steels” -- Doc. IX- 1305-83

นอกจากมาตรฐานของ IIW แล้ว ยังมีมาตรฐานการเชื่อมเหล็กใช้งานอุณหภูมิต่ำจากสถาบันอื่นๆอีกมากเช่น AWS, JIS, DIN เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- 1 The International Institute of Welding, Guide to The Welding and Weldability of Cryogenic Steels, ISBN 0 85300193 6
- 2 DA Wigley, Materials for Low Temperature Use, Oxford University Press, 1978.
- 3 Editorial Staff, Welding of LPG Storage Tanks, KOBELCO WELDING TODAY, January 2007, pp3-7
- 4 Ing Mittelstadt, The Welding Engineer's Current Knowledge, Part of Materials and their Behaviors during Welding, SLV Duisburg, 2000.
- 5 C.W. OTT, Welding Handbook Volume 4 Seventh Edition, American Welding Society , NY, 1982.
- 6 <http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel>, Wikipedia, the free encyclopedia, 2007.