

การใช้ค่าสมมูลคาร์บอน (CE) ในการคาดการณ์ค่าความแข็งในบริเวณกระตบร้อน ของรอยเชื่อมเหล็กผสมต่ำ-แข็งแรงสูง

Using Carbon Equivalent Prediction of HAZ Hardness in Welds of HSLA Steels

มนูญ เลิศวิจิตรพันธุ์

1. บทนำ

ค่าสมมูลคาร์บอน (CE) จะเป็นผลลัพธ์ของส่วนผสมทางเคมีของธาตุต่างๆที่ผสมอยู่ในเหล็กและธาตุเหล่านั้นจะให้ผลในทางเสริมหรือลดผลของคาร์บอนในเหล็กกล้า หากคาร์บอนมากจะชุบแข็งได้ง่ายกว่า เช่น เหล็กกล้าที่มีคาร์บอน 0.8% จะชุบได้ค่าความแข็งได้มากกว่าเหล็กกล้าที่มีคาร์บอน 0.4% หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเหล็กที่ชุบได้ค่าความแข็งสูงจะมีการยอมรับการชุบแข็ง (hardenability) สูง เหล็กคาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็งอาจเกิดการแตกร้าวได้ง่าย เนื่องจากโครงสร้างที่เกิดจากการชุบแข็ง (เช่น มาเทนไซด์) จะมีความแข็งสูงมาก มีความยืดหยุ่นตัวน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่มีความเครียดในตัวสูงมาก

2. Hardenability (การยอมรับการชุบแข็ง) : คำกำหนดที่มีผลต่อการยอมรับการเชื่อมของโลหะ

ในงานเชื่อมเหล็กกล้า เหล็กที่เชื่อมแล้วมีความแข็งแรง ไม่แตกร้าว เช่นเหล็กที่มีคาร์บอน 0.2% เรากล่าวว่าเหล็กนั้นมีค่าการยอมรับการเชื่อมสูง หรือมีค่า Weldability สูง ความร้อนจากการเชื่อมจะส่งผลเช่นเดียวกับการชุบแข็ง ดังนั้นเหล็กที่มีค่า Hardenability สูง เมื่อถูกเชื่อมก็อาจจะเกิดโครงสร้างแข็งและเปราะซึ่งไม่เป็นที่ปรารถนาในงานเชื่อม เพราะงานเชื่อมต้องการโครงสร้างที่เหนียวทั้งในรูปของความเหนียวยืด (ductility) หรือการยืดตัวได้มาก และในรูปของความเหนียวแกร่ง (toughness) หรือการดูดกลืนพลังงานที่เข้าชนกระแทกได้โดยไม่เกิดการแตกร้าว กล่าวคือถ้าค่า CE สูงแล้ว ค่า Hardenability จะมีค่าสูง แต่จะมีค่า Weldability ต่ำ

ค่า CE ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของส่วนผสมทางเคมีของธาตุต่างๆที่ผสมอยู่ในเหล็ก และธาตุเหล่านั้นจะให้ผลในทางที่เสริมคาร์บอนในการชุบแข็งเพื่อความสะดวกในการใช้งานจึงจัดทำสูตรเพื่อใช้หาค่า CE ได้ง่าย ให้แสดงค่าเป็นตัวเลขน้อยหลัก และแสดงถึงอิทธิพลของส่วนผสมต่อการชุบแข็งอย่างชัดเจน

โดยทั่วไปเหล็กกล้าคาร์บอนจะใช้สูตรหาค่า CE ระดับเบื้องต้นดังนี้

$$[1] \quad CE = C + Mn/4 \quad (1)$$

หรือ

$$CE = C + (Mn+Si)/4 \quad (2)$$

สูตรหลายสูตรได้นำน้ำหนักต่อทองแดง (Cu), โครเมียม (Cr), โมลิบดีนัม (Mo), นิกเกิล (Ni) และวานาเดียม (V) ในกรณีที่มีเหล็กผสมต่ำหรือเหล็กไมโครอัลลอย (micro-alloyed steels) เมื่อได้พบทวนจากเอกสารต่างๆที่เกี่ยวข้องแล้วปรากฏว่า ในรอบสิบปีที่ผ่านมาสูตร

หาค่า CE เกิดขึ้นมากมาย หลายสูตรได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงชนิด สูตรที่พัฒนานี้จะบ่งบอกถึงการยอมรับการเชื่อมและสามารถเป็นแนวทางในการเลือกใช้เหล็กและอุณหภูมิอุ้งานก่อนเชื่อม (Preheat) สมาคมการเชื่อมแห่งอเมริกา (American Welding Society: AWS) ได้จัดรวบรวมสูตรหาค่า CE และพิมพ์เผยแพร่ในสื่อสิ่งพิมพ์ของสมาคมดังแสดงในตารางที่ 1 ค่า CE เกิดขึ้นมากับสิบลสูตร หลายสูตรได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงชนิด สูตรที่พัฒนานี้จะบ่งบอกถึงค่าการยอมรับการเชื่อมของเหล็กชนิดนั้นด้วย

3. การตัดสินใจเลือกใช้สูตรหาค่า CE

สูตรที่จำเป็นต้องใช้ในงานเฉพาะทาง ที่มีการระบุรายละเอียดส่วนผสมทางเคมีของวัสดุที่จะทำการเชื่อม ผลจากการคำนวณค่า CE ด้วยสูตรต่างๆค่อนข้างจะคล้ายคลึงกัน เนื่องจากอิทธิพลของธาตุผสมหลักๆที่ผสมอยู่ในโลหะนั้น เช่นคาร์บอน แมงกานีส โมลิบดีนัม และโครเมียม เป็นต้น

วัสดุสามารถจัดจำแนกเป็นกลุ่มได้ หากธาตุผสมแต่ละตัวให้ค่า CE ที่เหมือนกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 วัสดุที่จัดอยู่ในกลุ่มที่มีค่า CE เท่ากันจะมีการยอมรับการเชื่อมที่เท่ากัน ในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นถึงใช้ข้อมูลค่า CE ในการจำแนกกลุ่มวัสดุเพื่อการตรวจรับรองเบื้องต้น (prequalified) การใช้งานทั่วไปของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าคาร์บอน-แมงกานีส เราจะสามารถคาดการณ์และปฏิบัติการเชื่อมด้วยพารามิเตอร์ในการอุ้งาน (pre-heat) และอบงานหลังการเชื่อม (post-heat) ตามคำแนะนำใน AWS D1.1 Structural Welding Code-Steel ได้อย่างเหมาะสม

ในบางครั้งค่า CE ก็ก่อให้เกิดความไม่ชัดเจนขึ้น (เนื่องจากมีหลายสูตร และเหล็กบางเกรดก็เข้าได้กับหลายมาตรฐาน) ในบางครั้งค่า CE ของวัสดุใน Class 1 และ Class II ก็อาจไม่นำผลที่ถูกประเมินมาใช้งาน เนื่องจากค่า CE ยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ทำให้ส่งผลต่อการเชื่อมน้อย เช่นค่า CE เพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 0.3 จะส่งผลต่อการเชื่อมน้อย แต่ค่า CE ที่เพิ่มขึ้นจาก 0.6 เป็น 0.7 จะส่งผลต่อการเชื่อมมาก แต่ถึงแม้จะเพิ่มขึ้นน้อยก็ควรเพิ่มความระมัดระวังในการทำงานมากขึ้น ดังนั้นวัสดุตาม Class III , IV, และ V จะมีความละเอียดอ่อนที่ต้องพิจารณาอย่างเข้มงวดมากขึ้นตามค่า CE ที่เพิ่มขึ้น ทั้งยังต้องใช้ทั้งความรู้และประสบการณ์ประกอบการวินิจฉัยใช้งานดังเช่นในงานซ่อมบำรุงที่มีชิ้นส่วนข้อต่อโครงสร้างเหล็ก 2 ชนิด ส่วนที่ 1 เป็นเหล็ก AISI 4130 ขึ้นรูปด้วยวิธีทุบขึ้นรูป (forging) ซึ่งเทียบเท่า

Class IV ในตารางที่ 2 และส่วนที่ 2 เป็นวัสดุ AISI 4145 (ซึ่งเทียบเท่า Class V ในตารางที่ 2) ดังนั้นค่า CE ของงานเชื่อมเหล็ก 2 ชนิดนี้จะมีค่า CE อยู่ ระหว่าง 0.59-0.79 ทำให้ต้องใช้ค่าประสพการณ์และการดูแลงาน อย่างใกล้ชิดในการทำงานเชื่อมซ่อมบำรุงนี้ และจากประสพการณ์

เหล็กที่มีค่า CE ที่ต่ำกว่า 0.30 มักเป็นเหล็กที่เชื่อมได้ง่าย ไม่ค่อยมีการแตกร้าว ไม่ต้องระวังมากในเรื่องของการใช้ความร้อนในการเชื่อม

ตารางที่ 1 สูตรหาค่า Carbon Equivalent: CE ที่รวบรวมจากเอกสารสิ่งพิมพ์ของ American Welding Society: AWS

สูตรหาค่า CE	เอกสารสิ่งพิมพ์ของ AWS
$CE = C + (Mn+Si) / 6 + (Cr+Mo+V) / 5 + (Ni+Cu) / 15$	D1.1; Appx. XI
$CE = C + Mn / 6 + (Cr+Mo+V) / 5 + (Ni+Cu) / 15$	D1.5, D3.6 Eq.1 & IIW
$CE = C + Mn / 6 + 0.05$ (ใช้เมื่อรู้ค่าของ %C, Mn แต่ไม่สามารถหาค่า % ธาตุอื่นได้)	D3.6Eq.2
$CE = C + Mn / 6 + Ni / 20 + Cr / 10 + Cu / 40 - Mo / 50 - V / 10$	D8.8
$CE = C + 0.31Si + 0.33P + 0.455 - 0.028Mn$ (ใช้กับเหล็กหล่อเท่านั้น)	D11.2 Eq.1
$CE = C + 0.31Si + 0.33P + 0.455 - 0.028Mn + Mo + Cr - 0.020 - 0.02Ni - 0.01Cu$ (ใช้กับเหล็กหล่อเท่านั้น)	D11.2 Eq.2
$CE = C + Mn / 6 + Ni / 20 + Cr / 10 - Mo^* / 40 - V / 10$ เมื่อ Mo มีมากกว่า 0.50% จึงจะนำมาคิดในค่า CE ด้วย	Alloy Steels, D14.3
$CE = C + Mn / 6 + Si / 4$	Structural Steels, D14.3
$CE = C + Mn / 6 + Mo / 4 + Cr / 5 + Ni / 15 + V / 5$	D14.5

ตารางที่ 2 การจัดจำแนกโลหะงานและค่า CE สูงสุด (ตาม AWS D14.5-80)

กลุ่มของโลหะงานที่จัดจำแนก	ค่า CE สูงสุด
Class I, Carbon Steels: AISI/SAE 1005, 1006, 1008, 1010, 1013, 1015, 1016, 1017, 1018, 1020, and 1021	0.38
Class II, Carbon manganese structural steels: ASTM A36, A53Gr B, A106, A139, A381 Gr Y35, A500, A501, A516, A529, A570 Gr D and E, A573; API 5-LGr B; ABS Grs A, B, C, CS, D, E, and R.	0.48
Class III, High Strength Low Alloy Steels: ASTM A242 Weldable Grade, A441, A537 Grs A and B, A572 Grs 42,45, and 50, A588, A618, ; API 5L Gr B and 5XL Gr 42; ABS GRs AH, DH, and EH	0.63
Class IV, High Strength Low Alloy Columbium, Vanadium Steels: ASTM A572 Grs 55, 60, and 65.	0.54
Class V, High Strength Quenched and Tempered Alloy Steels: ASTM A514 and A516	0.74

ตารางที่ 3 แนวทางการเลือกใช้ระดับอุณหภูมิในการอุ่นงาน (pre-heat) ที่แปรผันกับค่า CE

ค่า Carbon Equivalent: CE	ระดับอุณหภูมิในการอุ่นงาน
0.02 - 0.45%	พิจารณาเลือก(อุ่น / ไม่อุ่น)
0.45 - 0.60 %	200°-400°F (94 – 205°C)
สูงมากกว่า 0.60%	400°-700°F (205 – 372°C)

ค่า CE ที่บางครั้งก็ก่อให้เกิดความไม่ชัดเจน แต่บางครั้งก็เป็นแนวทางที่มีประโยชน์มาก ในกรณีที่ค่า CE ถูกนำมาพิจารณา มักถูกนำไปใช้พิจารณาถึงเรื่องอุณหภูมิการอุ่นงาน การยืดหดตัวจากการเชื่อม และการควบคุมไฮโดรเจน ซึ่งการอบงาน (post-heat) ไม่สามารถทำได้ ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากการอุ่นงาน การรักษาอุณหภูมิของงานระหว่างการเชื่อม (interpass temperature) การเลือกลดเชื่อมให้เข้ากับเนื้องาน และการเพิ่มเปอร์เซ็นต์รอยเชื่อม ต่างก็เป็นค่าพารามิเตอร์ที่เสริมผลดีที่จะเกิดต่อรอยเชื่อมทั้งในแง่ความแข็งแรง ความคงรูปไม่บิดเบี้ยวจากการเชื่อม และไม่แตกร้าวทั้งงานเชื่อมและสร้าง

เหล็ก High Strength Low Alloy: HSLA ซึ่งผลิตด้วยกระบวนการวิธี Quench and Temper: Q&T steel ซึ่งอยู่ใน Class IV และ V มีค่า CE อยู่ในช่วง 0.5-0.8 ซึ่งค่อนข้างสูงถึงสูงมาก ทำให้การยอมรับการเชื่อม (weldability) ค่อนข้างต่ำ

ความสำเร็จในการเชื่อมเหล็ก Q&T เช่นเหล็กเกรด E420-690 มักประเมินจากส่วนผสมทางเคมีในรูปของค่า CE การออกแบบกระบวนการเชื่อม (Welding Procedures) จะใช้ค่าความแข็งในบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) เป็นตัวควบคุมการแตกร้าวเย็น (cold cracking) หากความแข็งยิ่งสูงการแตกร้าวยิ่งเกิดง่าย ซึ่งการควบคุมความแข็งในบริเวณกระทบร้อนจะสามารถควบคุมได้ด้วยการใช้ค่า CE และอัตราการเย็นตัว $T_{8/5}$ (อัตราเย็นตัวหลังการเชื่อมผ่านช่วงอุณหภูมิ 800-500°C) เป็นเครื่องมือ ดังความสัมพันธ์ในสมการ

$$HV_{max} = H + \frac{K}{\exp(bY)^2} \quad (3)$$

เมื่อ $H = 167 \times CE_{BH}^{2.42} + 137$

$K = 939 \times C - 167 \times CE_{BH}^{2.42} + 147$

$b = \exp(-0.013 \times H + 0.8)$

$$CE_{BH} = C + \frac{Mn}{2.9} + \frac{Si}{11} + \frac{Ni}{17} + \frac{Cr}{3.2} + \frac{Cu}{3.9} + \frac{Mo}{3.4}$$

$Y = T_{8/5}$ (Cooling time from 800°C to 500°C in seconds)

ในปีค.ศ. 1981, K. Lorenz และ C. Duren ได้ศึกษาและสร้างสมการเพื่อใช้ประเมินค่าความแข็งในบริเวณ HAZ ดังนี้

$$HV_x = 2019[(1-0.5\log t_{8/5}) \times C + 0.3(CE_B - C)] + 66(1-0.8 \log t_{8/5}) \quad (4)$$

For 0 < % martensite < 100

เมื่อ

$$CE_B = C + \frac{Mn}{8} + \frac{Si}{11} + \frac{Ni}{17} + \frac{Cr}{5} + \frac{Cu}{9} + \frac{Mo}{6} + \frac{V}{3}$$

$$HV_M = 802 \times C + 305 \text{ for } 100\% \text{ martensite}$$

$$HV_B = 350 \times CE_B + 101 \quad \text{for } 100\% \text{ bainite}$$

และในปีเดียวกันนี้ T.Terasaki ได้สร้างสมการ และปรับปรุงในปี ค.ศ. 1984 เพื่อใช้ประเมินค่าความแข็งสูงสุดในบริเวณ HAZ ขึ้นดังนี้

$$\tau, \tau_M, HV_{max} = H_o + (H_M + H_o) \exp[-0.2 \{ \tau / \tau_M - 1 \}] \quad (5)$$

$$\tau \leq \tau_M, HV_{max} = H_M = 812 \times C + 293$$

เมื่อ

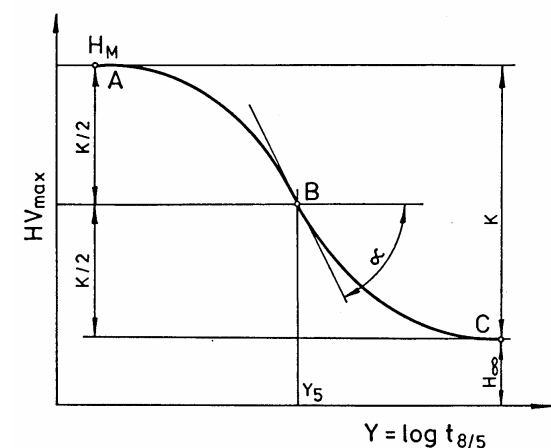
$$H_o = 16 \times C + \frac{Si}{2} + \frac{Cr}{7} + \frac{Mo}{2} + V + Cb + 7B + 153 \log \tau_m = 2.5 \times P_v \quad 1.27$$

$$P_v = C + \frac{Mn}{3} + \frac{Cu}{4} + \frac{Ni}{8} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{3} + 5B$$

τ_M = Cooling time giving 100% martensite

ในปี ค.ศ. 1981, N.Yurioka และคณะ ได้ศึกษาและผูกความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งสูงสุด (HV_{max}) ในบริเวณกระทบร้อนกับอัตราผกผันของการเย็นตัว ($T_{8/5}$) ดังภาพที่ 1 และในปี ค.ศ. 1987 ได้จัดทำเป็นรูปสมการอย่างง่าย ดังนี้

$$HV_{max} = 442 \times C + 99CE_{ii} + 206 + (402 \times C - 90CE_{ii} + 80) \times \arctan(X) \quad (6)$$



ภาพที่ 1 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับอัตราการเย็นตัวในบริเวณกระทบร้อน

H_{∞} = ค่าความแข็งสูงสุดที่อัตราการเย็นตัว $T_{8/5}$ ใน 60 วินาที

B = แนวกึ่งกลางภาคตัดรอยเชื่อม

a = ค่าความชันของเส้นโค้ง H (ที่จุดกึ่งกลางภาคตัดรอยเชื่อม)

K, Y_5 = ค่าแปรผันตามส่วนผสมทางเคมี

ตารางที่ 4 ส่วนผสมทางเคมี (% โดย น.น.) ของชิ้นทดสอบ

Element	Steel Grade			
	18G2A	18G2AV	10GHMBA	14HNMB Cu
C	max. 0.20	max. 0.20	max. 0.10	0.11 - 0.18
Mn	1.00 – 1.50	1.20 – 1.65	0.60 – 1.00	0.60 – 1.00
Si	0.20 – 0.55	0.20 – 0.60	0.15 – 0.35	0.15 – 0.35
P (max)	0.035	0.035	0.015	0.030
S (max)	0.035	0.035	0.010	0.030
Cr	max. 0.30	max. 0.30	1.00 – 1.40	0.40 – 0.65
Ni	max. 0.30	max. 0.30	max. 0.25	0.70 – 1.00
Cu	max. 0.30	max. 0.30	0.25 – 0.40	0.25 – 0.40
Mo	---	---	0.40 – 0.60	0.40 – 0.60
V	---	0.50 – 0.15	---	0.30 – 0.08
Al	0.02 – 0.06	0.02 – 0.06	0.02 – 0.06	0.02 – 0.06
B	---	---	max. 0.004	max. 0.005
Cb	---	---	0.015 – 0.035	---
Ti	---	---	0.01- 0.03	---

$$เมื่อ \quad X = \frac{\log(t_8/5) \quad 2.3CE_i \quad 1.35CE_{iii} + 0.882}{1.15CE_i \quad 0.673CE_{iii} \quad 0.601}$$

$$CE_i = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{12} + \frac{Cr}{8} + \frac{Mo}{4} + \Delta H$$

$$CE_{ii} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{5} + \frac{Cu}{10} + \frac{Ni}{18} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{2.5} + \frac{V}{5} + \frac{Cb}{3}$$

$$CE_{iii} = C + \frac{Mn}{3.6} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4}$$

การยอมรับการชุบแข็งที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากธาตุโบรอนและไนโตรเจนที่ผลิต จากเตา Basic oxygen ($S \leq 0.016\%$, $O_2 \leq 60$ ppm) ได้กำหนดไว้ดังนี้

$$\Delta H = 0 \text{ เมื่อ } B \leq 1 \text{ ppm}$$

$$\Delta H = 0.03f_N \text{ เมื่อ } B = 2 \text{ ppm}$$

$$\Delta H = 0.06f_N \text{ เมื่อ } B = 3 \text{ ppm}$$

$$\Delta H = 0.09f_N \text{ เมื่อ } B \geq 4 \text{ ppm}$$

$$\text{และ } f_N = (0.02 - N) / 0.02$$

4. การทดลอง

ชิ้นงานเหล็กแผ่น Q&T ที่มีจำหน่ายทั่วไป จำนวน 12 ชิ้น ความหนาตั้งแต่ 12 – 25 มม. จาก 11 ครั้งการผลิต (11 melts) โดยเลือกจากเหล็กเกรด 18G2A, 18G2AV, 14HNMBCu, 10GHMBA ซึ่งเป็นเหล็ก Q&T Al-killed มีค่าความเค้นครากที่ 420-690 MPa (60.9-100ksi) ก่อนทำการเชื่อมได้ทำการทดสอบหาสมบัติทางกลด้วยแรงดึงได้ผลดังแสดงไว้ในตารางที่ 5 และวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีได้ผลตามตารางที่ 4 จากนั้นจึงคำนวณค่า CE ตามตารางที่ 6 ด้วยสูตรหาค่า CE จำนวน 5 สูตร ดังนี้

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni + Cu}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5}$$

$$CE_{BWI} = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Ni + Cu}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5}$$

$$CE_{LD6} = C + \frac{Mn}{16} + \frac{Si}{23} + \frac{Ni}{34} + \frac{Cr}{11} + \frac{Cu}{19} + \frac{Mo}{12} + \frac{V}{6}$$

$$CEN = C + [0.75 + 0.25 \tanh 20(C - 0.12)] \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cu}{15} + \frac{Cr + Mo + Cb + V}{5} + 5B$$

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

เหล็กจำนวน 6 ชิ้นจากแต่ละเกรด จำนวนรวม 6x12=72 ชิ้น จะถูกยึดตรึงอยู่บนแบบจับงาน Controlled Thermal Severity Test (CTS test) ตามภาพที่ 2 แล้วเชื่อมด้วยลวดไฮโดรเจนต่ำ โดยควบคุมพารามิเตอร์ในการเชื่อมดังนี้ กระแสไฟเชื่อม 170-190 Amp. แรงดันไฟฟ้าเชื่อม 25-33 V. ความเร็วเดินแนวเชื่อม 0.17-0.28 cm/s(4-6.6 in./min) ค่าพลังงานความร้อนในการเชื่อม (Heat input) 17.8-30.2 kJ/cm(45-77kJ/in.) อุณหภูมิทดสอบความแข็งแรงที่ 80 °C ถึง (-20)°C, อัตราการเย็นตัว

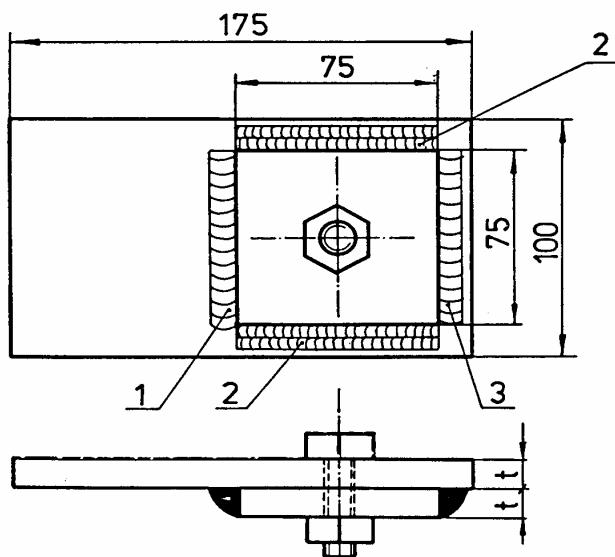
ตารางที่ 5 สมบัติทางกล, ด้านการดึงของชิ้นทดสอบ

Steel Grade	Yield Strength min. (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
18G2A	420	490 - 680	18
18G24V	460	550 - 720	17
10GHMBA	620	720 - 890	15
14HNMBCu	690	770 - 940	13

ของ $T_{8/5}$ ที่ระดับต่างๆ และบันทึกค่า $T_{8/5}$ ที่อยู่ระหว่าง 14-20 วินาที ค่าความแข็งแรงสูงสุดใน HAZ ได้ตรวจวัดและบันทึก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 6 ค่า CE และค่าความแข็งสูงสุดในบริเวณเชื่อม

Steel Grade	Melt No.	Thickness (mm.)	Carbon Equivalent (%)					HV _{max} Crack / no Crack
			CE _{LD6}	P _{cm}	CE _{BW1}	CE _{IW}	CEN	
18G2A	414097	12	0.254	0.234	0.423	0.371	0.365	--- / 304
18G2A	424994	12	0.263	0.242	0.450	0.396	0.389	--- / 315
18G2A	711176	25	0.275	0.252	0.482	0.425	0.416	334 / 344
18G2A	720946	25	0.261	0.240	0.443	0.388	0.382	305 / 330
18G2AV	414827	12	0.293	0.264	0.485	0.432	0.426	--- / 330
18G2AV	302662	12	0.299	0.271	0.491	0.428	0.431	--- / 332
18G2AV	302662	25	0.299	0.271	0.491	0.428	0.431	299 / 349
18G2AV	524628	25	0.335	0.301	0.550	0.500	0.501	357 / 373
10GHMBA	114110	12	0.356	0.302	0.727	0.687	0.357	380 / 401
10GHMBA	116520	12	0.315	0.267	0.622	0.570	0.386	442 / 397
14HNMBCu	17649	12	0.360	0.320	0.618	0.560	0.548	459 / 466
14HNMBCu	61692	12	0.397	0.355	0.665	0.620	0.626	464 / 473



ภาพที่ 2 Controlled Thermal Severity (CTS)

Test Specimen
1 = 3-test welds
2 = anchor weld
t = Plate thickness

5. ผลการทดสอบ

จากค่าที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบ ได้นำมาวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อการจัดกลุ่ม เป็นกลุ่ม ๆ ดังนี้

1. ค่าความแข็งสูงสุดใน HAZ ที่ไม่เกิดการแตกร้าว
2. ค่าความแข็งที่จะเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก(ยาวไม่เกิน 0.3 มม.)
3. ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็ง(ตารางที่ 7) จะเห็นว่าค่า HV_{max cri}

จะเพิ่มขึ้นตามค่า CE ในแนวที่เป็นการแปรผันตรง

4. ค่า HV_{max cri} ในตารางที่ 7 ค่าบนจะเป็นแนวโน้มที่จะไม่เกิดการแตกร้าวถึง 50% ค่าล่างจะเป็นแนวโน้มที่จะไม่เกิดการแตกร้าวถึง 90%

5. ในการศึกษา ค่า CE_{LD6} เป็นค่าที่ใช้หาค่าความแข็งใน HAZ ได้ดีที่สุด (เนื่องจากมีค่าเบี่ยงเบนจากการทดลองน้อยที่สุด)

ตารางที่ 7 ผลทางสถิติแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความแข็งสูงสุดในบริเวณกระพือร้อนกับค่า CE ในบริเวณเชื่อม

Carbon Equivalent Formula	Regression Equation for 90% Confidence of No Crack	Correlation Coefficient	Standard Deviation of CE
CE _{LD6}	HV _{max} = 1144*CE _{LD6} + 12	0.954	0.04962
	HV _{max} = 1144*CE _{LD6} - 17		
P _{cm}	HV _{max} = 1352*P _{cm} - 7	0.831	0.03658
	HV _{max} = 1352*P _{cm} - 55		
CE _{BW1}	HV _{max} = 491*CE _{BW1} + 102	0.806	0.09775
	HV _{max} = 491*CE _{BW1} + 53		
CE _{IW}	HV _{max} = 461*CE _{IW} + 143	0.795	0.10254
	HV _{max} = 461*CE _{IW} + 93		
CEN	HV _{max} = 472*CEN + 163	0.670	0.08447
	HV _{max} = 472*CEN + 112		

6. สรุป

1) จากค่าตัวเลขเพียงเล็กน้อยของส่วนผสมแต่เมื่อทำออกมาในรูปของค่า CE แล้ว ค่า CE ที่หาได้จะมีผลอย่างมากในการประเมินการยอมรับการเชื่อมได้อย่างรวดเร็ว ด้วยวิธีการอุ้งงานจะช่วยให้เหล็กกล้ามีการยอมรับการเชื่อมได้มากขึ้น

2) ค่า CE จะช่วยบอกอุณหภูมิอุ้งงานขั้นต่ำที่จะใช้ และข้อควรระวัง หรือแนวทางอื่นๆ ที่ไม่ปรากฏใน Code/ Specification อย่างชัดเจน และใช้เป็นเครื่องมือเพื่อการหลีกเลี่ยงการแตกร้าวในบริเวณ HAZ ด้วยการใส่ค่า CE เป็นเครื่องมือในการควบคุมความร้อนป้อนเข้า-อัตราการเย็นตัวหลังทำการเชื่อม

3) ในการศึกษา-ทดลองนี้ ค่า CE_{LD6} เป็นค่าที่ใช้ในการทำนายการเกิดการแตกร้าวจากไฮโดรเจนของเหล็ก HSLA ในช่วงความหนา 12-25 มม. (Yield Strength 420-690 MPa) ได้ใกล้เคียงที่สุด (เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรหาค่าความแข็งอื่นๆ ในตารางที่ 7)

4) ด้วยการเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ทำให้บริเวณกระทบร้อน (HAZ) เกิดการแตกร้าวในตารางที่ 7 ได้ ทำให้เราสามารถควบคุมความร้อนเข้า-อัตราการเย็นตัวจาก 800 ถึง 500 °C ($t_{8/5}$) เพื่อควบคุมความแข็ง ทำให้ได้งานเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูง โดยไม่เกิดการแตกร้าวในบริเวณกระทบร้อน ซึ่งเป็นจุดที่แตกร้าวได้ง่ายของรอยเชื่อมเหล็ก HSLA

เอกสารอ้างอิง:

- [1] William F.Newell. Jr. Understanding and Using Carbon Equivalent Formulas, Welding Journal, September 1995.
- [2] Z.Zaczek and Cwiek, Prediction of HAZ Hardness in Welds of Quenched and Tempered HSLA Steels, Welding Journal, January 1993.
- [3] ANSI/AWS D1.1-2000 Structural Welding Code-Steel. American Welding Society, Miami, Fla.
- [4] Lin, G.E., Welding Metallurgy, Vol. 2 , 4th ed, The American Welding Society, Mimi Fla.