

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

จากตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการจำลองการเชื่อมพบว่ามีความเหมาะสมเพื่อความสะดวกจึงแสดงเป็นอักษรย่อตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงอักษรย่อของโครงสร้างจุลภาคที่พบในบริเวณกระทบร้อน^{13,14}

สัญลักษณ์ที่ใช้	ความหมายของโครงสร้างจุลภาค
GF	Grain boundary ferrite
AF	Acicular ferrite
PF	Polygonal ferrite
FS	Ferrite with aligned secondary phase
P	Lamellar pearlite
B	Bainite
M	Martensite
A	Austenite
WF	Widmanstätten pattern

4.1 คุณสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50

4.1.1 ส่วนผสมทางเคมี

ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมทางเคมี (% โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50 จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Emission spectrometer

C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni
0.154	0.325	1.29	0.013	0.006	0.001	0.028

Al	Ti	V	Cu	O	N
0.033	0.027	0.114	<0.020	0.00144	0.009085

4.1.2 ความแกร่งและความแข็ง

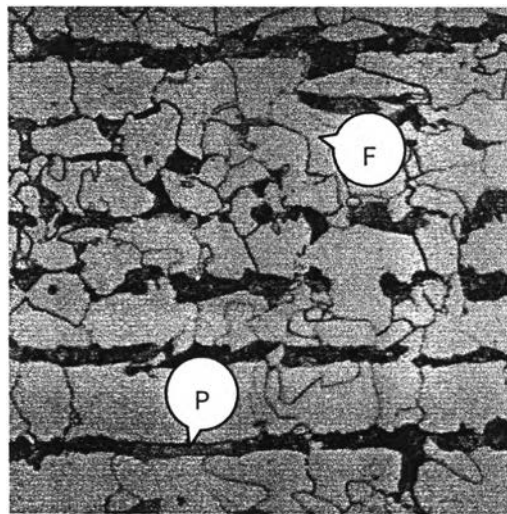
ตารางที่ 4.3 ความแกร่งและความแข็งของเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50

ความแกร่งที่ 25 ° C (J)	140
ความแข็ง (HV10)	173



ค่าความแกร่งและความแข็งของเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50 ที่ผ่านการรีดร้อนที่อุณหภูมิเริ่มรีด 1250 ° C และอุณหภูมิสุดท้าย 870 ° C พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์ เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาครูปที่ 4.1 ประกอบพบว่าประกอบด้วยโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์ - เพิร์ลไลท์ดังที่คาดไว้

4.1.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50



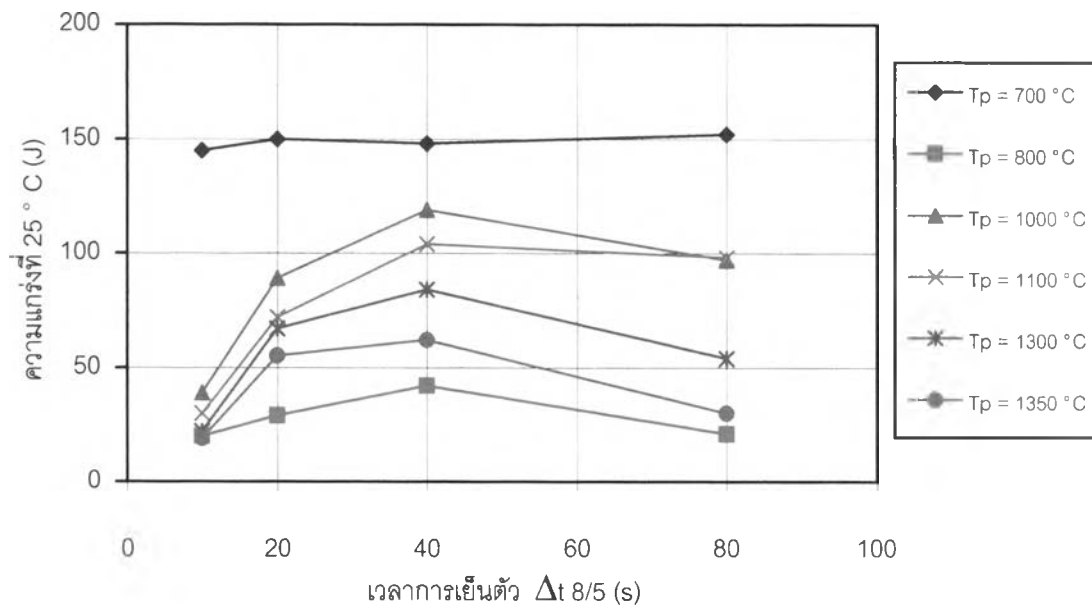
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50 ที่ผ่านการรีดร้อนที่อุณหภูมิ 1250 ° C กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 4.1 พบว่าโครงสร้างจุลภาคในสภาพที่ผ่านการรีดร้อนเป็นเฟอร์ไรท์ - เพิร์ลไลท์ โดยเพิร์ลไลท์เรียงตัวเป็นเส้นขนานกันตามแนวการรีด ซึ่งเป็นลักษณะปกติของเหล็กที่ผ่านการรีดร้อน ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของเนื้อเหล็ก ส่งผลต่อความแกร่งในแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน เรียกว่า Toughness anisotropy

4.2 ผลของรอบการเชื่อมเดียว

การทดลองนี้ศึกษาผลของรอบการเชื่อมเดียวโดยแปรผัน T_p ไปที่ 700, 800, 1000, 1100, 1300 และ 1350 °C และแปรผัน $\Delta t_{8/5}$ ที่ 10, 20, 40 และ 80 s

4.2.1 ความแกร่งหลังจากผ่านรอบการเชื่อมเดียว



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งที่ 25 °C กับเวลาการเย็นตัวที่อุณหภูมิสูงสุดค่าต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.2 สามารถแบ่งช่วงอุณหภูมิ T_p ได้เป็น 4 ช่วง คือ

1. $T_p = 700^\circ\text{C}$ เป็นช่วงอุณหภูมิต่ำ (Tempered) ต่ำกว่าเส้น A_c_1 , ความแกร่งมีค่าคงที่ตลอดช่วง $\Delta t_{8/5} = 10 - 80$ s เนื่องจากเป็นช่วงที่ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส ทำให้โครงสร้างจุลภาค (ภาคผนวก ข รูปที่ ข.1 (ก) ถึง (ง)) ยังเป็นเฟอร์ไรต์ - เพิร์ลไลต์ เหมือนโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก ASTM A 572 เกรด 50 ที่ผ่านการรีดร้อน (รูปที่ 4.1) และมีความแกร่งเท่า ๆ กัน ประมาณ 140 J

2. $T_p = 800^\circ\text{C}$ เป็นช่วงอุณหภูมิวิกฤต (Intercritical) ซึ่งอยู่ระหว่างเส้น A_c_1 และ A_c_3 พบว่าความแกร่งมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิสูงสุดอื่น ๆ โดยที่ $\Delta t_{8/5} = 10$ s มีความแกร่งต่ำที่สุดเพียง 18 J เมื่อพิจารณาแผนภูมิ CCT (รูปที่ 4.5) และภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค (รูปที่ ข.2) ประกอบพบว่า เมื่อ $\Delta t_{8/5} = 10 - 20$ s โครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์ เบนไนท์ ความแกร่งจึงต่ำ และเมื่อ $\Delta t_{8/5} = 40 - 80$ s โครงสร้างจุลภาคเป็น เฟอร์ไรต์ เพิร์ลไลต์และเบนไนท์

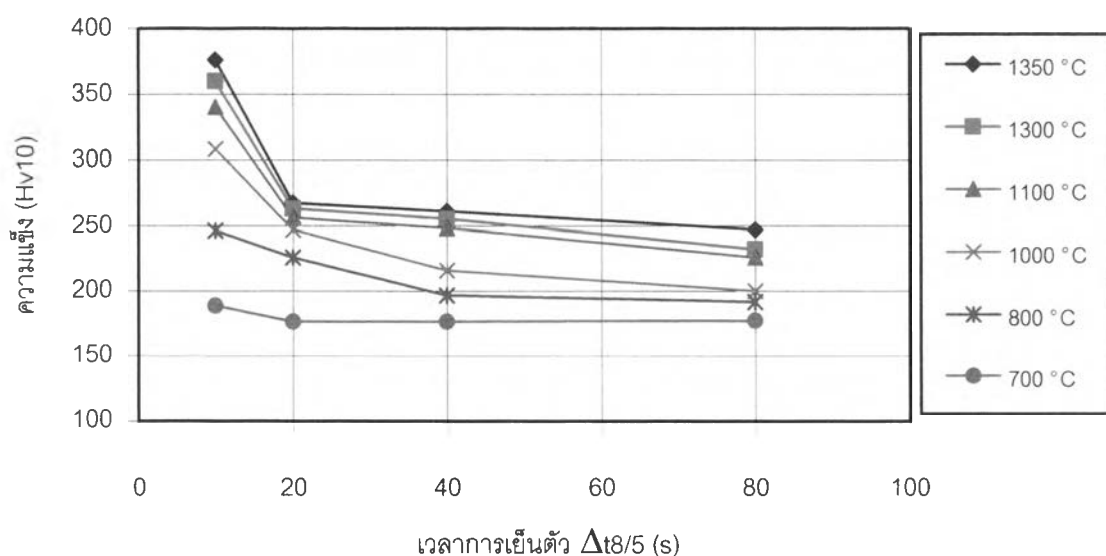
3. $T_p = 1000 - 1100^\circ\text{C}$ เป็นช่วงอุณหภูมิตกผลึกใหม่ (Recrystallization) อยู่สูงกว่าเส้น Ac_3 ถ้าดูในภาคผนวก ข รูปที่ ข.3 ($T_p = 1000^\circ\text{C}$) พบว่าโครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่เป็น P, F, B เกรนละเอียด แต่รูปที่ ข.4 ($T_p = 1100^\circ\text{C}$) เริ่มปรากฏเฟส GF และ WF ความแข็งแรงจึงลดลง

4. $T_p = 1300 - 1350^\circ\text{C}$ เป็นช่วงอุณหภูมิเกรนโตใกล้เส้นหลอมเหลว ความแข็งแรงมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิตกผลึกใหม่ เมื่อ $\Delta t_{8/5} = 10 - 20$ s โครงสร้างจุลภาคเป็น FS, WF และเมื่อ $\Delta t_{8/5} = 40 - 80$ s โครงสร้างจุลภาคเป็น GF เกรนโต, WF, PF, AF

เมื่อพิจารณาผลของเวลาการเย็นตัว $\Delta t_{8/5}$ พบว่า $\Delta t_{8/5} = 40$ s ของอุณหภูมิสูงสุดทุกค่ามีความแข็งแรงสูงสุด เพื่ออธิบายสาเหตุขอเลือก $T_p = 1350^\circ\text{C}$ มาอธิบาย จากรูปที่ 4.4 (ก) เมื่อ $\Delta t_{8/5} = 10$ s โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่เป็น FS เมื่อ $\Delta t_{8/5} = 20$ s โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่เป็น FS, และ AF มากขึ้น เมื่อ $\Delta t_{8/5} = 40$ s โครงสร้างจุลภาคเป็น AF ภายในเกรนอสเตนไนท์ที่เกิดก่อนและมี GF เกิดขึ้น ที่ $\Delta t_{8/5} = 40$ s มีความแข็งแรงสูงสุดแสดงว่าเฟส AF ภายในเกรนช่วยเพิ่มความแข็งแรง และเมื่อเวลาการเย็นตัวนานขึ้น $\Delta t_{8/5} = 80$ s โครงสร้างส่วนใหญ่เป็น GF เกรนโตมากและมีความแข็งแรงต่ำ

เมื่อพิจารณาแผนภูมิ CCT (รูปที่ 4.5) ประกอบพบว่าเมื่อ $\Delta t_{8/5} = 10, 20$ s จะได้โครงสร้างจุลภาค AF และเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาครูปที่ 4.4 ก และ ข พบว่ามี AF ตามแผนภูมิ CCT แต่มีความแข็งแรงต่ำเนื่องจาก AF ที่เกิดกระจายทั่วไป ขณะที่ $\Delta t_{8/5} = 40$ s AF เกิดอยู่ภายในเกรน ความแข็งแรงจึงสูงกว่า

4.2.2 ความแข็งแรงหลังจากผ่านรอบการเชื่อมเดียว

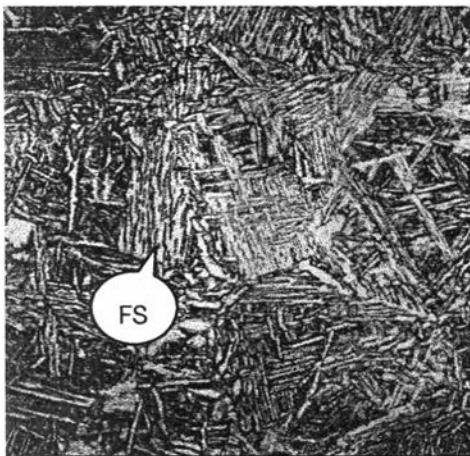


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับเวลาการเย็นตัวที่อุณหภูมิสูงสุดค่าต่าง ๆ

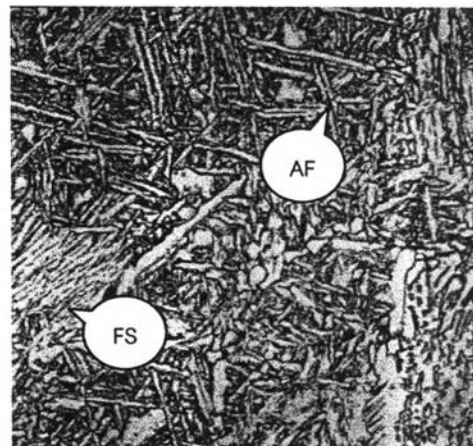
จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อกำหนดให้อุณหภูมิสูงสุดคงที่แล้วพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับ $\Delta t_{8/5}$ พบว่าช่วง $\Delta t_{8/5} = 10 - 20$ s ความแข็งจะลดลงอย่างสม่ำเสมอเมื่อ $\Delta t_{8/5}$ เพิ่มขึ้น แต่เมื่อถึงช่วง $\Delta t_{8/5} = 20 - 80$ s ความแข็งจะลดลงอย่างช้า ๆ เพื่ออธิบายสาเหตุขอเลือกที่ $T_p = 1350$ °C มาอธิบายเช่นเดียวกับความแกร่ง จากการพิจารณาแผนภูมิ CCT รูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อ $\Delta t_{8/5}$ เพิ่มขึ้น โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่ที่เป็นเบนไนท์ที่แข็งมีปริมาณลดลงจนกระทั่งเหลือเฉพาะเฟสเฟอร์ไรท์กับเบนไนท์ที่แข็งน้อยกว่า เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาครูปที่ 4.4 สามารถเรียงค่าความแข็งได้ดังนี้ คือ $FS > WF > AF > GF$

4.2.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านรอบการเชื่อมเดียว

ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอบการเชื่อมเดียวทั้งหมดแสดงอยู่ที่ภาคผนวก ข ในที่นี้จะยกตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของรอบการเชื่อมเดียวที่ $T_p = 1350$ °C



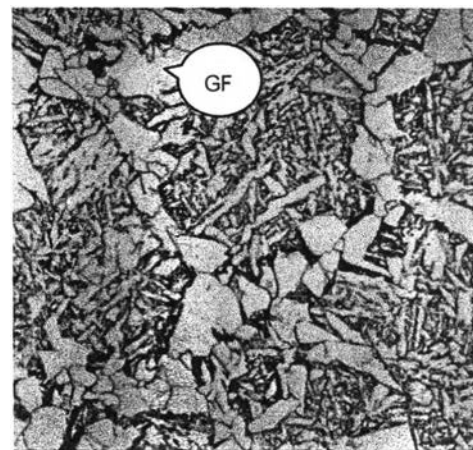
(น) $\Delta t_{8/5} = 10$ s



(ข) $\Delta t_{8/5} = 20$ s



(ค) $\Delta t_{8/5} = 40$ s



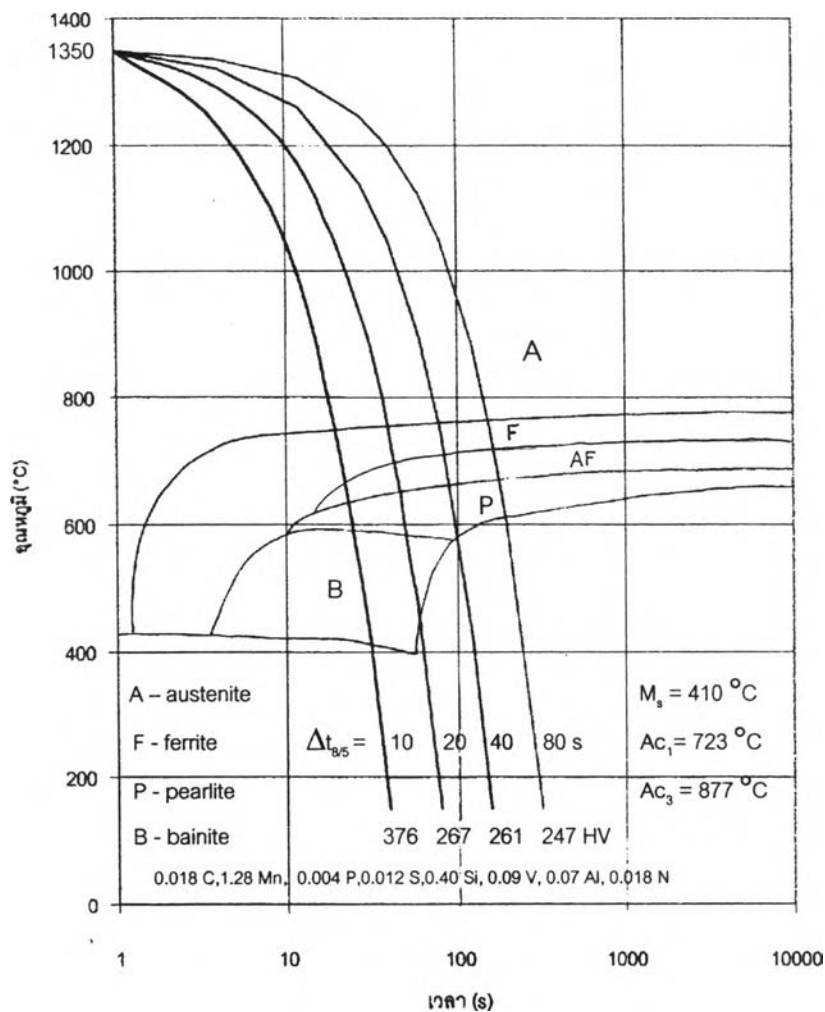
(ง) $\Delta t_{8/5} = 80$ s

รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนซึ่งผ่านรอบการเชื่อมเดียวที่ $T_p = 1350$ °C

500 เท่า

4.2.2 การเย็นตัวของรอบการเชื่อมเดี่ยวเทียบกับแผนภูมิการเย็นตัว

เนื่องจากเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50 เป็นเหล็กเกรดพิเศษที่สามารถแปรผันปริมาณธาตุผสมได้ขึ้นกับความต้องการนำไปใช้งาน ดังนั้นการทำนายโครงสร้างจุลภาคขณะเย็นตัวจึงจำเป็นต้องเทียบกับแผนภูมิ CCT ของเหล็กชนิดอื่น ๆ ที่มีส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกัน จาก การเปรียบเทียบพบว่าใกล้เคียงกับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมปริมาณน้อยมาก HSLA VAN-80¹⁵

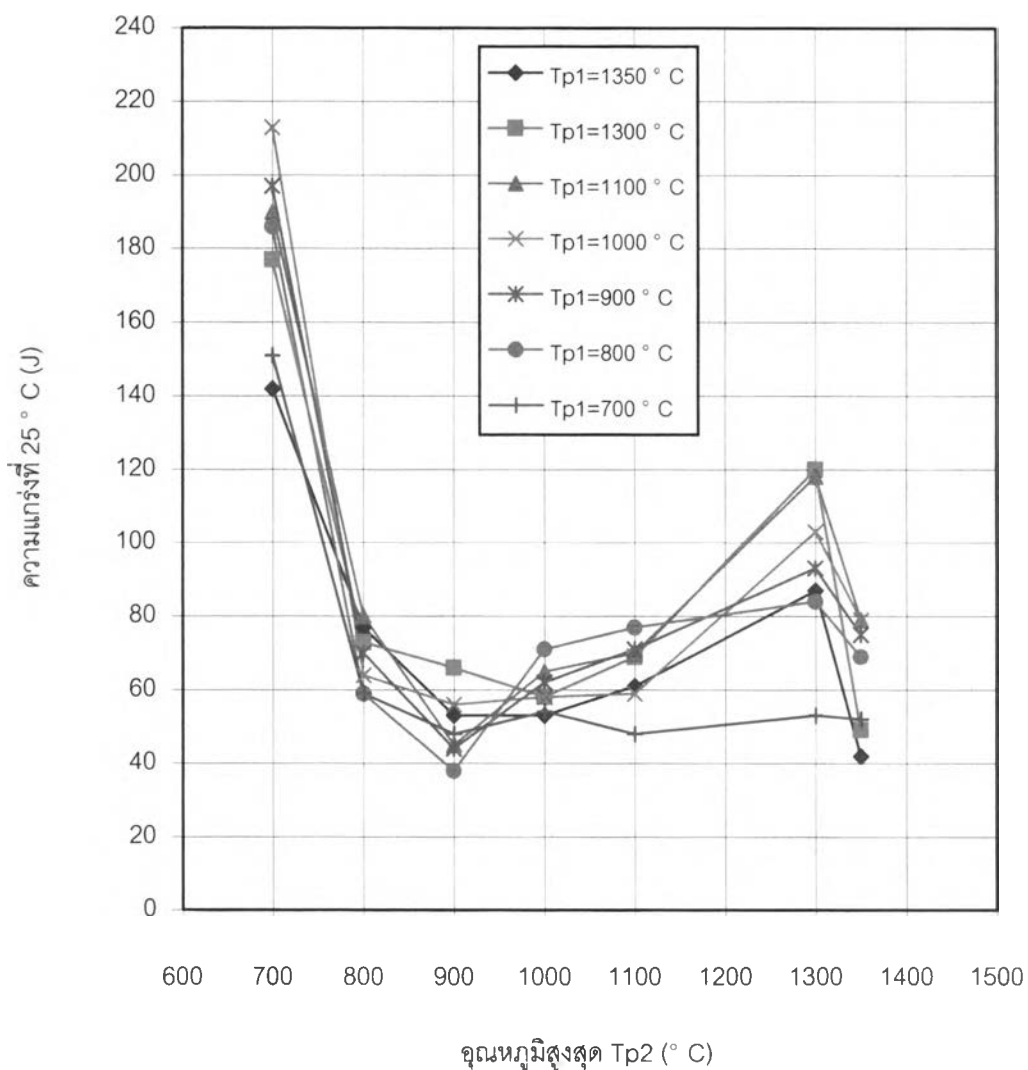


รูปที่ 4.5 การเย็นตัวของรอบการเชื่อมเดี่ยวเทียบกับแผนภูมิ CCT ของเหล็ก HSLA VAN - 80

4.3 ผลของรอบการเชื่อมคู่

การศึกษาผลของรอบการเชื่อมคู่จะแปรผัน T_{p1} และ T_{p2} ที่ 700, 800, 900, 1000, 1100, 1300 และ 1350 °C และ $\Delta t_{8/5(1)} = \Delta t_{8/5(2)} = 20$ s

4.3.1 ความแกร่งหลังจากผ่านรอบการเชื่อมคู่



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งที่ 25°C กับอุณหภูมิสูงสุดของรอบการเชื่อมที่สอง เมื่อ

กำหนดให้ $\Delta t_{8/5(1)} = \Delta t_{8/5(2)} = 20$ s

จากรูปที่ 4.6 เนื่องจากแนวโน้มของเส้นกราฟทุกเส้นไปในทางเดียวกันจึงขอเลือกเส้น $Tp_1 = 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ มาอธิบาย โดยแบ่ง Tp_2 ได้เป็น 4 ช่วง คล้ายกับรอบการเชื่อมเดี่ยว

1. $Tp_2 = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความแกร่งที่ Tp_2 นี้มีค่าประมาณ 142 J ซึ่งสูงกว่าเหล็กที่ผ่านรอบการเชื่อมเดี่ยวเมื่อ $Tp = 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่มีค่าประมาณ 55 J แสดงว่ารอบการเชื่อมที่สองเมื่อ $Tp_2 = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ สามารถปรับปรุงความแกร่งได้ดีที่สุด ถ้าดูรูปที่ 4.9 (ก) พบว่าประกอบด้วย GF ขนาดไมโต ภายในเกรนมี AF ผสมบ้าง ลักษณะโครงสร้างจุลภาคแบบนี้คล้ายรูปที่ 4.4 (ค) ความแกร่งจึงมีค่าสูง ในขณะที่ $Tp_2 > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีความแกร่งอยู่ในช่วง 38 – 118 J ใกล้เคียงกับรอบการเชื่อมเดี่ยวที่มีค่าในช่วง 28 – 90 J แต่เมื่อเปรียบเทียบกับความแกร่งของเหล็กที่ผ่านการรีดร้อนที่ได้มา (140 J) พบว่ารอบการเชื่อมคู่เมื่อ $Tp_2 > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีค่าความแกร่งต่ำกว่า

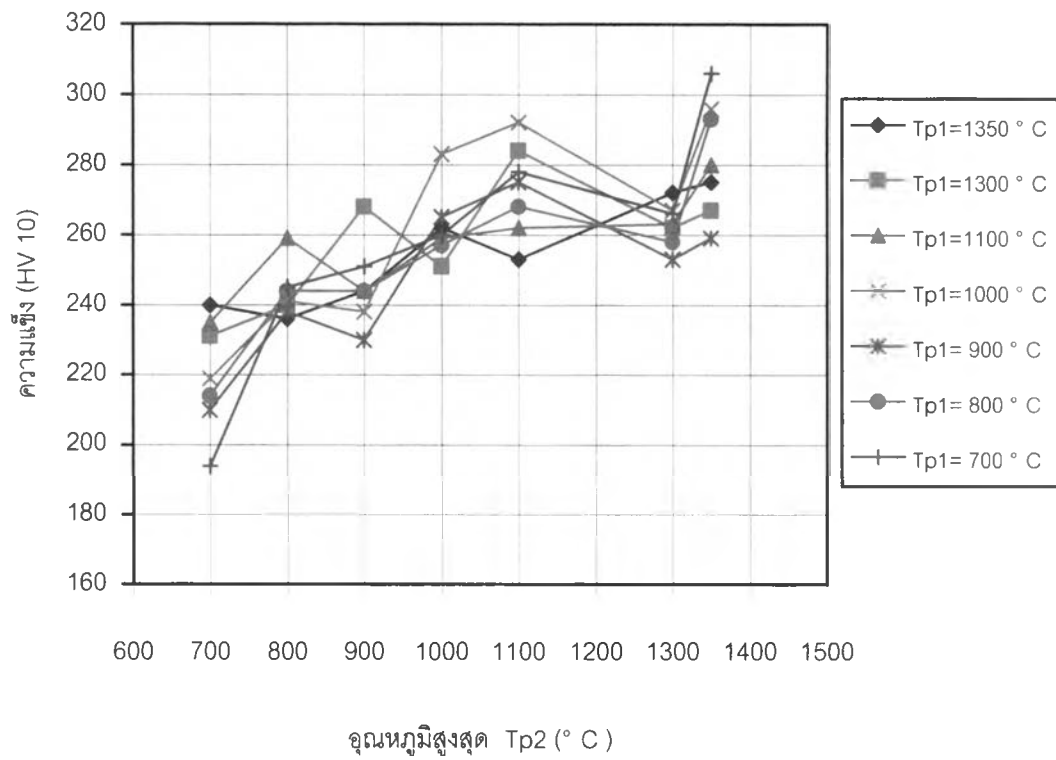
2. $Tp_2 = 800 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นช่วงอุณหภูมิที่เรียกว่า Intercritically reheated coarse-grained ความแกร่งมีค่าต่ำที่สุด (ดูรูปที่ 4.9 (ข)) สาเหตุอาจเกิดจากการแตกที่เกิดจากการให้ความร้อนซ้ำ¹⁴(Reheat cracking) เนื่องจากมีส่วนผสมของธาตุที่มีความไวต่อการแตก เช่น Cu, Mo, B, V, Nb และ Ti ที่มีปริมาณมากเกินไป ในการดูรอยแตกอาจไม่สามารถดูได้จากกล้องจุลทรรศน์จำเป็นต้องใช้ SEM ในการตรวจสอบ

3. $Tp_2 = 1000 - 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความแกร่งมีค่าสูงขึ้น ถ้าดูจากแผนภูมิ CCT (รูปที่ 4.8) และรูปโครงสร้างจุลภาค (รูปที่ 4.9 (ข) (ค) และ (ง)) ประกอบ เมื่อ Tp_2 เพิ่มขึ้นจะได้โครงสร้างจุลภาค FS, GF, P, B ขนาดเกรนละเอียด

4. $Tp_2 = 1300 - 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นช่วงอุณหภูมิเกรนโตอีกครั้ง เมื่อ $Tp_2 = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าความแกร่งสูงกว่าที่ $Tp_2 = 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อดูรูปโครงสร้างจุลภาค (รูปที่ 4.9 (จ) และ (ฉ)) อธิบายได้ว่า ที่ $Tp_2 = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ เกิดเฟส AF อยู่ภายในเกรนคล้ายรูปที่ 4.4 (ข) แต่ $Tp_2 = 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ เกิดเฟส FS ประกอบ GF คล้ายรูปที่ 4.4 (ข) ความแกร่งจึงต่ำ

4.3.2 ความแข็งหลังจากผ่านรอบการเชื่อมคู่

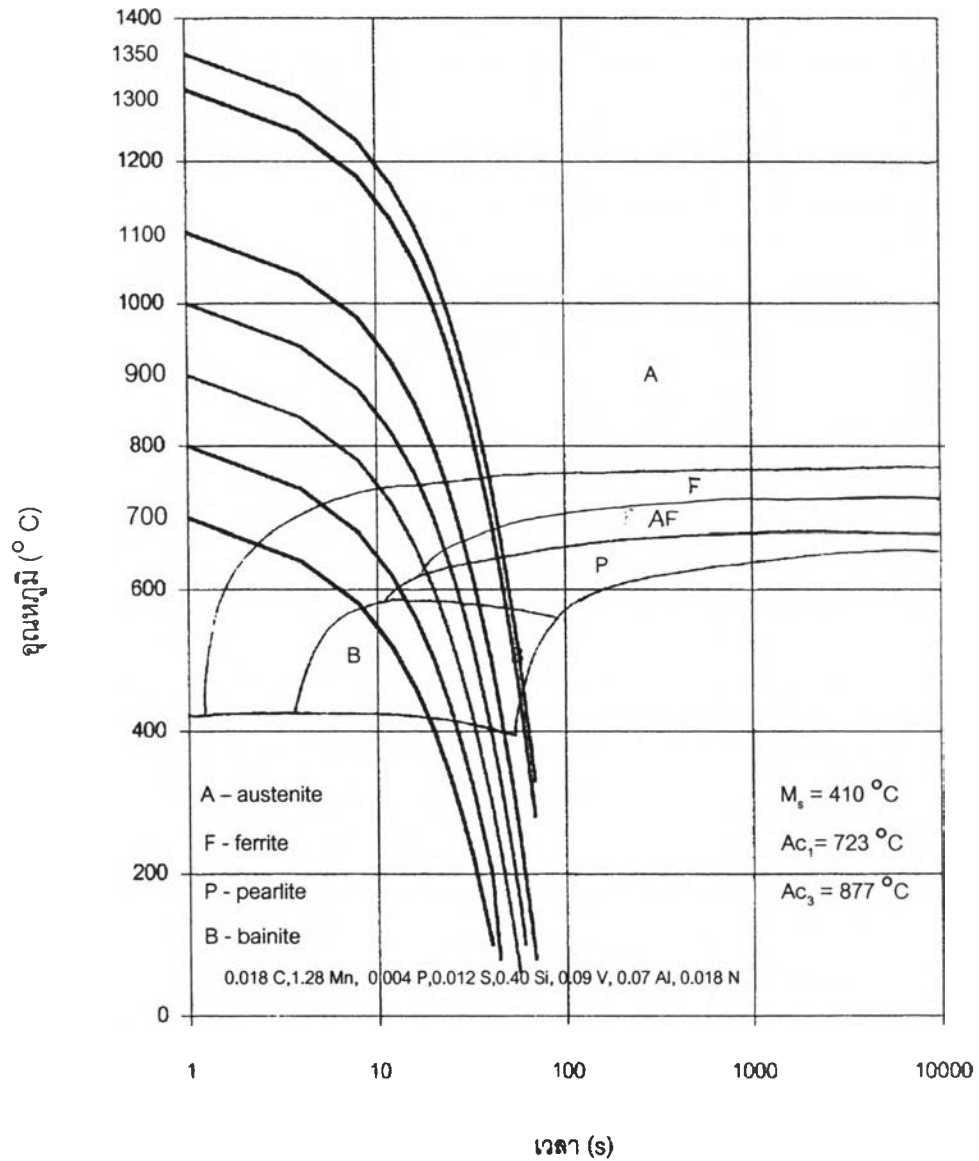
จากรูปที่ 4.7 พบว่าแนวโน้มของเส้นกราฟทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิสูงสุดของรอบการเชื่อมที่สองที่เพิ่มขึ้นสาเหตุเพราะว่าเมื่อ Tp_2 เพิ่มขึ้นจะได้โครงสร้างจุลภาคที่แข็งได้แก่ เบนไนท์และเฟิร์สไลต์ และความแข็งของอุณหภูมิ Tp_2 จะเกาะกลุ่มกันไม่แตกต่างกันมาก โดยอยู่ในช่วง 200 – 300 HV และความแข็งทั้งหมดจะสูงกว่าเหล็กที่ผ่านการรีดร้อน (173 HV)



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับอุณหภูมิสูงสุดของรอบการเชื่อมที่สอง เมื่อกำหนดให้

$$\Delta t_{8/5(1)} = \Delta t_{8/5(2)} = 20 \text{ s}$$

4.3.3 การเย็นตัวของรอบการเชื่อมคู่เทียบกับแผนภูมิการเย็นตัว



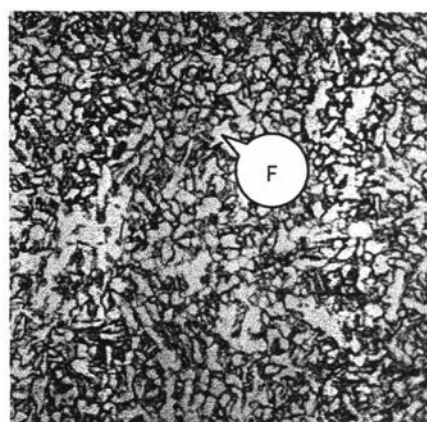
รูปที่ 4.8 การเย็นตัวของรอบการเชื่อมคู่เมื่อ $\Delta t_{8/5(1)} = \Delta t_{8/5(2)} = 20\text{ s}$ เทียบกับแผนภูมิ CCT ของเหล็ก HSLA VAN-80

4.3.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านรอบการเชื่อมคู่

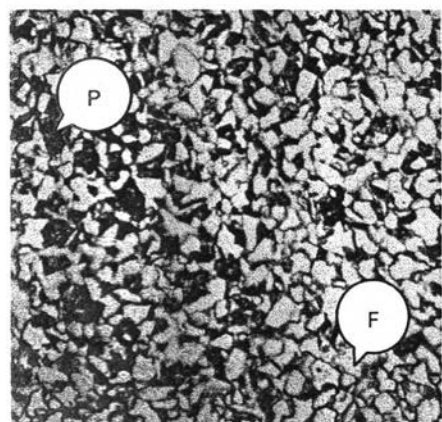
ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอบการเชื่อมคู่ทั้งหมดแสดงอยู่ที่ภาคผนวก ค ในที่นี้จะยกตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของรอบการเชื่อมคู่ที่ $T_{p1} = 1350^{\circ}\text{C}$



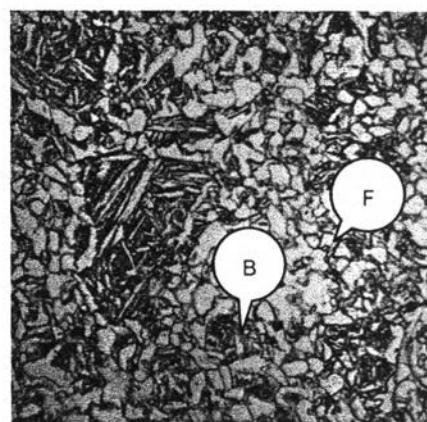
(ก) $T_{p2} = 700^{\circ}\text{C}$



(ข) $T_{p2} = 800^{\circ}\text{C}$



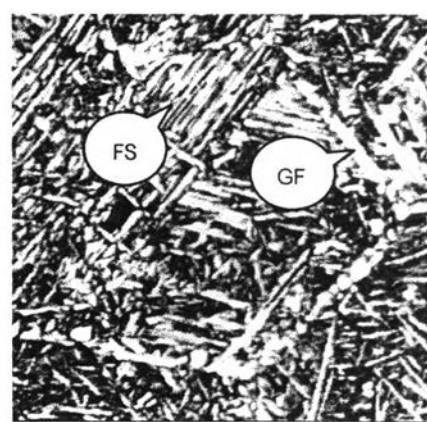
(ค) $T_{p2} = 1000^{\circ}\text{C}$



(ง) $T_{p2} = 1100^{\circ}\text{C}$



(จ) $T_{p2} = 1300^{\circ}\text{C}$



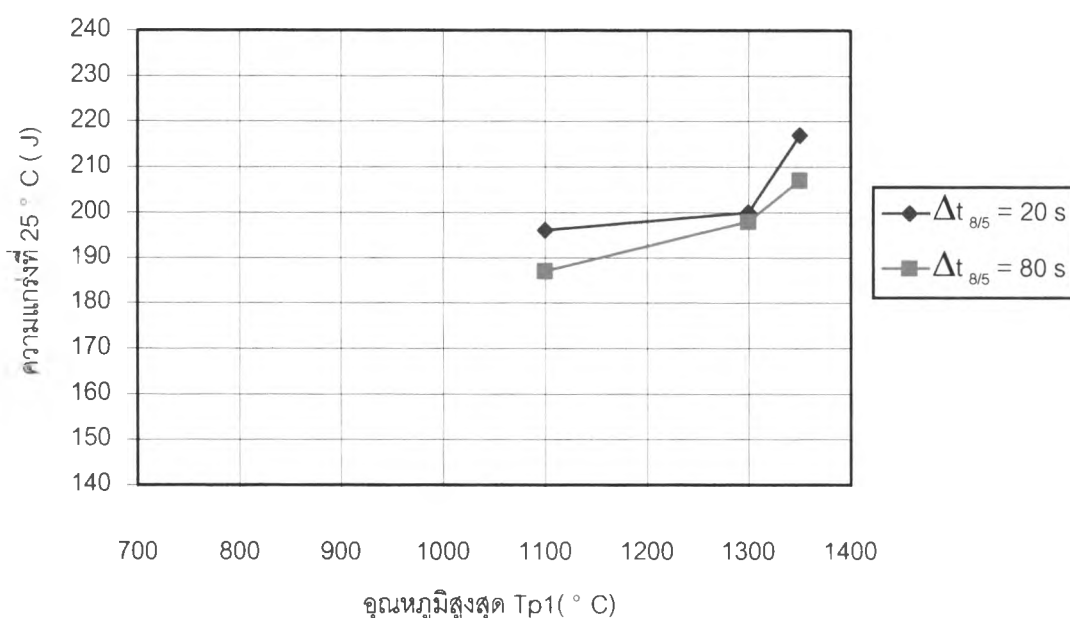
(ฉ) $T_{p2} = 1350^{\circ}\text{C}$

รูปที่ 4.9 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านรอบการเชื่อมคู่ เมื่อ $T_{p1} = 1350^{\circ}\text{C}$, $\Delta t_{8/5(1)} = \Delta t_{8/5(2)} = 20 \text{ s}$ 500 เท่า

4.4 ผลของรอบการเชื่อมหลายรอบ

รอบการเชื่อมหลายรอบที่ให้กับชิ้นงานมีทั้งหมด 4, 5 และ 6 รอบ สำหรับ 4 รอบการเชื่อมมี $T_{p1} = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับ 5 รอบการเชื่อมมี $T_{p1} = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ และสำหรับ 6 รอบการเชื่อมมี $T_{p1} = 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยที่ทุกรอบการเชื่อมจะกำหนดให้ $\Delta t_{8/5} = 20$ และ 80 s

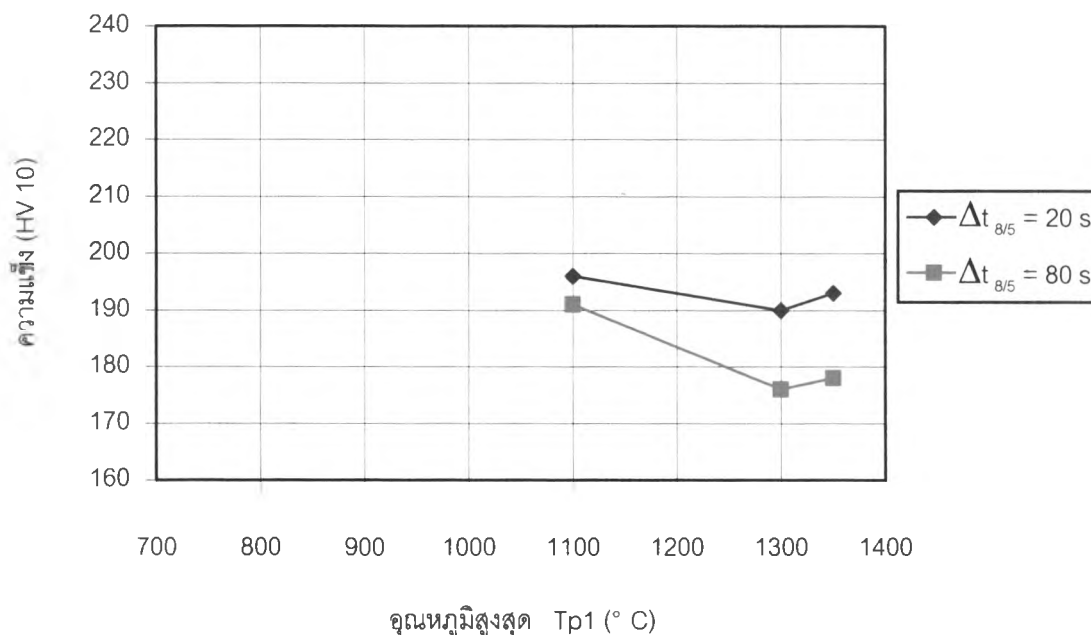
4.4.1 ความแกร่งหลังจากผ่านรอบการเชื่อมหลายรอบ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งที่ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ กับอุณหภูมิสูงสุดของรอบการเชื่อมที่ 1

จากรูปที่ 4.10 พบว่าทั้ง $\Delta t_{8/5} = 20$ และ 80 s ค่าความแกร่งเพิ่มขึ้นตาม T_{p1} หรือจำนวนรอบการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น ($T_{p1}=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ มี 4 รอบการเชื่อม $T_{p1}=1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ มี 5 รอบการเชื่อม และ $T_{p1}=1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ มี 6 รอบการเชื่อม) แต่ที่ $\Delta t_{8/5} = 20\text{ s}$ มีความแกร่งสูงกว่า $\Delta t_{8/5} = 80\text{ s}$ นอกจากนี้ค่าความแกร่งของรอบการเชื่อมหลายรอบยังมีค่าสูงกว่าเหล็กที่ผ่านการรีดร้อน และที่ผ่านรอบการเชื่อมคู่อีกด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากรอบการเชื่อมต่อ ๆ มาช่วยอบคืนไฟ (Tempered) รอบการเชื่อมครั้งก่อนและจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นทำให้มีเวลาอบคืนไฟนานกว่า จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าเมื่อ $\Delta t_{8/5} = 20\text{ s}$ ได้เฟอไรท์-เพิร์ลไลท์ ที่มีขนาดเกรนเล็กกว่าที่ $\Delta t_{8/5} = 80\text{ s}$ เล็กน้อย ดังรูปที่ 4.12 และเมื่อจำนวนรอบการเชื่อมเพิ่มขึ้นปริมาณเพิร์ลไลท์จะลดลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาแผนภูมิ CCT (รูปที่ 4.13) ประกอบพบว่าที่ $\Delta t_{8/5} = 80\text{ s}$ จะได้โครงสร้างจุลภาค P,F แต่เมื่อ $\Delta t_{8/5} = 20\text{ s}$ โครงสร้างจุลภาคเป็น B, F เหมือนกับรูปที่ 4.12

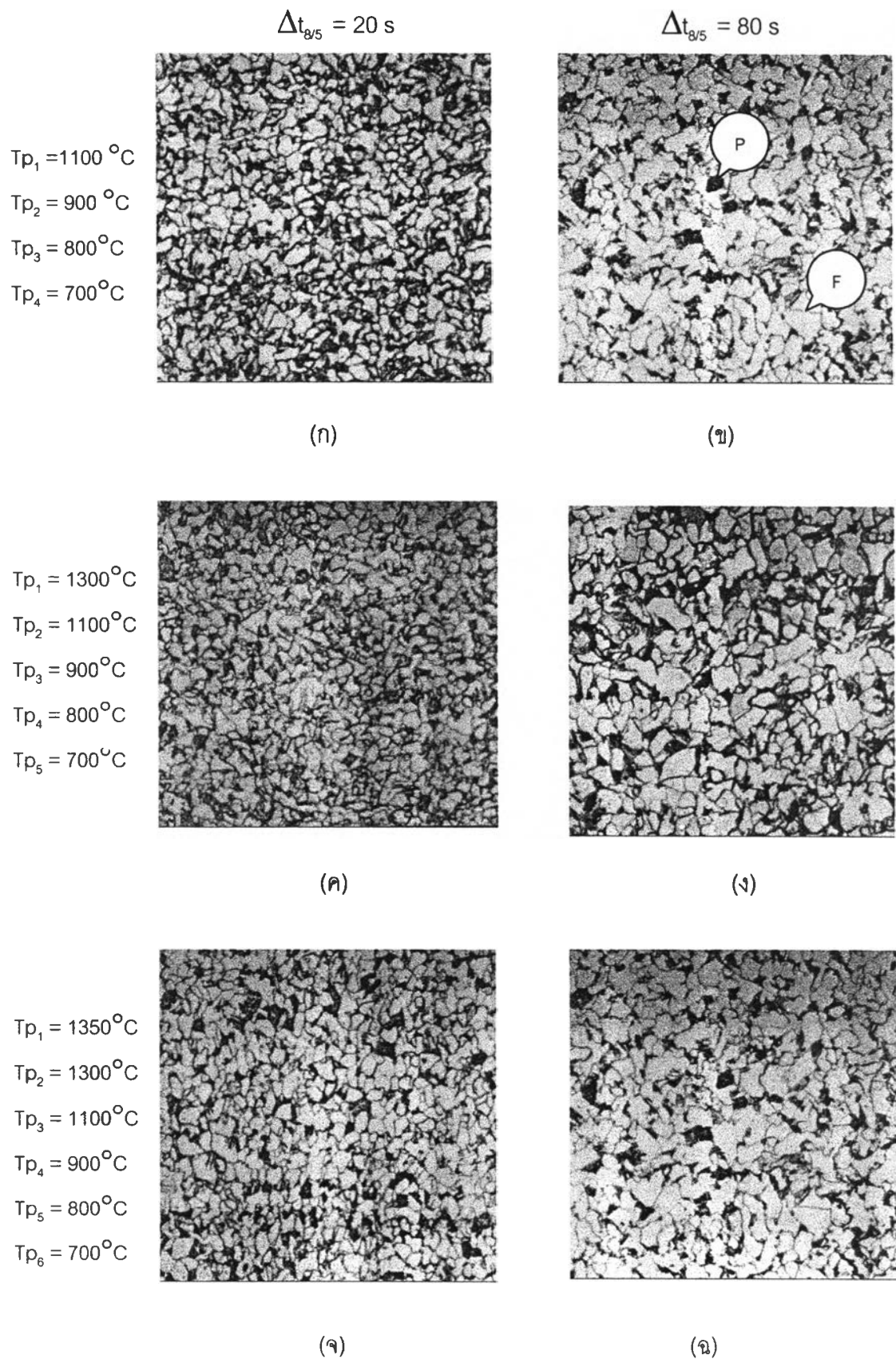
4.4.2 ความแข็งหลังจากผ่านรอบการเชื่อมหลายรอบ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับอุณหภูมิสูงสุดของรอบการเชื่อมที่ 1

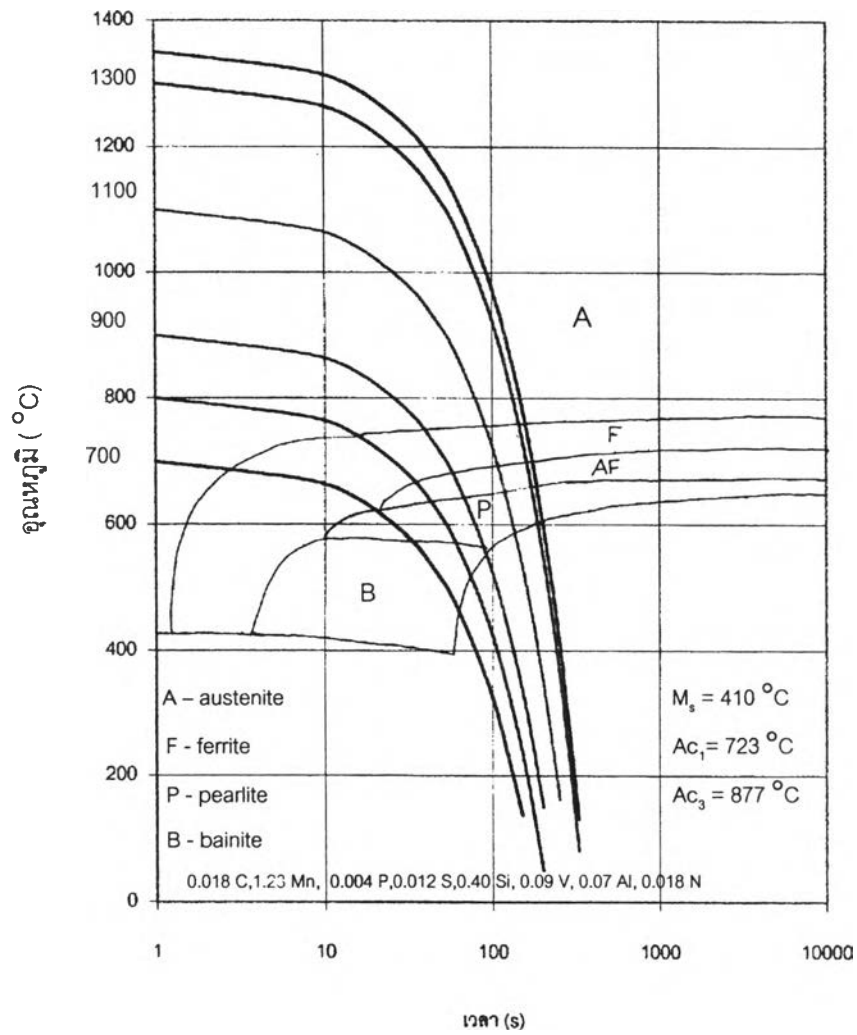
จากรูปที่ 4.11 พบว่าที่ $\Delta t_{8/5}$ ทั้ง 20 และ 80 s ค่าความแข็งมีค่าลดลงตามอุณหภูมิสูงสุดของรอบการเชื่อมที่ 1 (T_{p1}) ที่เพิ่มขึ้นช่วง 1100 – 1300 $^{\circ}\text{C}$ แต่เมื่อ $T_{p1} = 1350$ $^{\circ}\text{C}$ ความแข็งเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยทั้ง $\Delta t_{8/5} = 20$ และ 80 s และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง $\Delta t_{8/5} = 20$ กับ 80 s พบว่าค่าความแข็งเมื่อ $\Delta t_{8/5} = 20$ s มีค่าความแข็งสูงกว่าเมื่อ $\Delta t_{8/5} = 80$ s เนื่องจากที่ $\Delta t_{8/5} = 20$ s โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่ที่ได้เป็นเบนไนท์และเฟอร์ไรท์ แต่ที่ $\Delta t_{8/5} = 80$ s โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นเฟอร์ไรท์ เฟอร์ไรท์และเบนไนท์เล็กน้อยความแข็งจึงต่ำกว่า อย่างไรก็ตามค่าความแข็งบริเวณกระแทกร้อนของเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50 ที่ผ่านรอบการเชื่อมหลายรอบ (มีค่าอยู่ระหว่าง 176 – 196 HV) มีค่าสูงกว่าเหล็กที่ผ่านการรีดร้อน (173 HV)

4.4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านรอบการเชื่อมหลายรอบ



รูปที่ 4.12 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านรอบการเชื่อมหลายรอบ 500 เท่า

4.4.4 การเย็นตัวของรอบการเชื่อมหลายรอบเทียบกับแผนภูมิการเย็นตัว



รูปที่ 4.13 การเย็นตัวของรอบการเชื่อมหลายรอบ เมื่อ $\Delta t_{8/5} = 80\text{ s}$ เทียบกับแผนภูมิ CCT ของเหล็ก HSLA VAN - 80 ที่มีส่วนผสมใกล้เคียงกัน