

ผลของรอบการเชื่อมต่อความแกร่งและความแข็งที่บริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50



นายพรชัย ลากเจริญวงศา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0271-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 20600690

1 3 0.9. ๒๕๔๔

EFFECT OF WELD THERMAL CYCLES ON TOUGHNESS AND HARDNESS IN THE HEAT - AFFECTED
ZONE OF ASTM A 572 GRADE 50 STEEL

Mr.Pornchai Lapcharoenwongsa

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0271-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของรอบการเชื่อมต่อความแกร่งและความแข็งที่บริเวณกระแทกร้อน
ของเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50

โดย

นายพรชัย ลามเจริญวงศา


สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

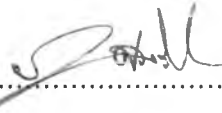
อาจารย์ที่ปรึกษา

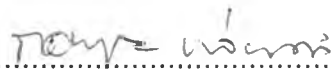
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

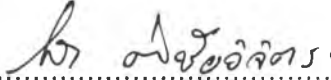
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ไสว ด่านชัยวิจิตร)

พรชัย ลาภเจริญวงศ์ : ผลของรอบการเชื่อมต่อความแกร่งและความแข็งที่บริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50. (Effect of Weld Thermal Cycles on Toughness and Hardness in the Heat-Affected Zone of ASTM A 572 Grade 50 Steel) อ.ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ , 65 หน้า . ISBN 974-03-0271-8.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของรอบการเชื่อม (Weld thermal cycle) ประกอบด้วยอุณหภูมิสูงสุดของรอบการเชื่อมและเวลาการเย็นตัวต่อความแกร่งและความแข็งบริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้าธาตุผสมปริมาณน้อยมาก ASTM A 572 เกรด 50 ด้วยวิธีจำลองการเชื่อม โดยแบ่งเป็น 3 การทดลองย่อยคือ การทดลองแรกศึกษาผลของรอบการเชื่อมเดี่ยว โดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงานไปที่อุณหภูมิ 700, 800, 1000, 1100, 1300 และ 1350°C แล้วทำให้เย็นด้วยเวลาการเย็นตัวระหว่าง 800 และ 500°C ($\Delta t_{8/5}$) เท่ากับ 10, 20, 40 และ 80 วินาที การทดลองที่สองศึกษาผลของรอบการเชื่อมคู่ โดยรอบการเชื่อมทั้งสองมีอุณหภูมิสูงสุดเป็น 700, 800, 900, 1000, 1100, 1300 และ 1350°C และ $\Delta t_{8/5}$ เท่ากับ 20 วินาที การทดลองที่สามศึกษาผลของรอบการเชื่อมหลายรอบ โดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงานด้วยอุณหภูมิสูงสุดของรอบแรกเป็น 1100, 1300 และ 1350°C ทำให้เย็นตัวด้วย $\Delta t_{8/5}$ เท่ากับ 20 และ 80 วินาที แล้วให้ความร้อนซ้ำโดยมีอุณหภูมิสูงสุดต่ำกว่ารอบแรก ทำซ้ำจนรอบการเชื่อมสุดท้ายมีอุณหภูมิสูงสุด 700°C จำนวนรอบการเชื่อม 4 - 6 รอบ จากนั้นทดสอบความแกร่งตามมาตรฐาน ASTM E23 - 96 และความแข็ง พร้อมทั้งตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ผลการทดลองพบว่ารอบการเชื่อมเดี่ยวความแกร่งมีค่าสูงเมื่อ $\Delta t_{8/5}$ เท่ากับ 40 วินาที ได้โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่เป็น AF (Acicular ferrite) อยู่ในเกรน แต่ความแข็งมีค่าสูงเมื่อ $\Delta t_{8/5}$ น้อยกว่า 20 วินาที ได้โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่เป็น FS (Ferrite with aligned secondary phases) และเปลี่ยนเป็น GF (Grain boundary ferrite) เกรนโตที่มีความแกร่งต่ำเมื่อ $\Delta t_{8/5}$ เท่ากับ 80 วินาที สำหรับรอบการเชื่อมคู่เมื่ออุณหภูมิสูงสุดของรอบการเชื่อมที่สอง (T_{p2}) เท่ากับ 700 °C ช่วยปรับปรุงความแกร่งได้ดีที่สุดเพราะโครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่เป็น AF อยู่ในเกรน ส่วนความแข็งเพิ่มตามค่า T_{p2} ได้โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่เป็น FS สำหรับรอบการเชื่อมหลายรอบพบว่าจำนวนรอบการเชื่อมเพิ่มขึ้นช่วยปรับปรุงความแกร่งโดยที่ความแข็งลดลงเล็กน้อย เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรท์ เฟอร์ไรต์เกรนละเอียด

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2544.....

4070554021 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORDS : WELD THERMAL CYCLES / HEAT – AFFECTED ZONE / ASTM A 572 GRADE 50 STEEL

PORNCHAI LAPCHAROENWONGSA.THESIS TITLE: EFFECT OF WELD THERMAL CYCLES ON TOUGHNESS AND HARDNESS IN THE HEAT-AFFECTED ZONE OF ASTM A 572 GRADE 50 STEEL. THESIS ADVISOR : ASSIST.PROF.GOBBOON LOTHONGKUM (DR.ING) , 65 pp. ISBN 974-03-0271-8 .

Effect of weld thermal cycles on toughness and hardness in the heat - affected zone of ASTM A 572 grade 50 steel were simulated with three experiments. The first experiment studied the effect of single weld thermal cycle with peak temperatures (T_p) of 700,800,1000,1100,1300 and 1350 °C and cooling times between 800 and 500 °C ($\Delta t_{8/5}$) of 10, 20, 40 and 80 seconds. The second experiment studied effect of the double weld thermal cycles with the first and second peak temperatures (T_{p1} & T_{p2}) of 700, 800, 900, 1000,1100 and 1350 °C and $\Delta t_{8/5(1)}$ equal $\Delta t_{8/5(2)}$ to 20 seconds.The third experiment studied the effect of the multi – weld thermal cycles by heating specimens to temperatures of 1100,1300 and 1350 °C , cooling and reheating to the peak temperature lower than T_{p1} until the last cycle reached to peak temperature of 700°C. The cooling time ($\Delta t_{8/5}$) are 20, 80 seconds .The total cycles were between 4 to 6 cycles. Toughness, hardness and microstructure of the simulated samples were studied.

For the single weld thermal cycle,the high toughness was observed when $\Delta t_{8/5}$ are 40 seconds and the major microstructure is AF (Acicular ferrite) .But the high hardness when $\Delta t_{8/5}$ are less than 20 seconds, the major microstructure is the fine ferrite with aligned secondary phases (FS) and changes to coarse grain boundary ferrite (GF) which low toughness when long cooling time ($\Delta t_{8/5}$ is 80 seconds). For the double weld thermal cycles, when T_{p2} is 700 °C the toughness was improved and the major microstructure is AF.The hardness increased with increasing T_{p2} and the major microstructure is FS . For the multi - weld thermal cycles, the more cycles were simulated, the more toughness, but hardness decreased slightly, the microstructure consist of fine ferrite and pearlite

Department Metallurgical Engineering....

Student 's signature.....*Pornchai Lapcharoenwongsa*

Field of study ... Metallurgical Engineering..

Advisor 's signature.....*Govboon Lothongkum*

Academic year ...2001.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์ด้วยความอนุเคราะห์ และความช่วยเหลือจากบุคคลต่าง ๆ มากมาย ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ ที่ให้คำปรึกษาด้วยดีมาตลอด ขอขอบคุณบริษัท แอล พี เอ็น เหล็กแผ่น จำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์เหล็กแผ่นที่ใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณกรมการค้า ที่ช่วยเหลือด้านการศึกษามาตลอด ขอขอบคุณนายอนุชิต ลามเจริญวงศ์ ที่สละเวลาเตรียมชิ้นงานให้ ขอขอบคุณนายธีรพงษ์ หาญวิโรจน์กุล และนางสาวอรยา วังศรี ที่ให้คำแนะนำและให้ยืมเครื่องคอมพิวเตอร์ ขอขอบคุณคุณเสนีย์ มณีเพชร ที่ช่วยสอนใช้เครื่องมือเตรียมชิ้นงาน ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่ช่วยเหลืองานวิจัยนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ธุรการภาค ฯ ทุกคนที่ช่วยอำนวยความสะดวก

สุดท้าย ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย และอาจารย์ ดร.ไสว ด้านชัยวิจิตร ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าเพื่อคำแนะนำงานวิจัยนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความรู้พื้นฐานของเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50.....	3
2.2 บริเวณกระทบร้อน.....	5
2.3 การทำนายโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของบริเวณกระทบร้อน.....	7
2.4 การจำลองการเชื่อม.....	8
2.5 การเชื่อมหลายแนว.....	9
2.6 งานวิจัยเกี่ยวกับการจำลองการเชื่อม.....	10
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	18
3.1 การเตรียมการทดลอง.....	18
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการเชื่อม.....	18
3.1.2 การเตรียมชิ้นงานทดลอง.....	19
3.2 การออกแบบการทดลอง.....	20
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	21
3.3.1 การทดลองที่ 1 การศึกษาผลของรอบการเชื่อมเดี่ยว.....	21
3.3.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของรอบการเชื่อมคู่.....	22
3.3.3 การทดลองที่ 3 การศึกษาผลของรอบการเชื่อมหลายรอบ.....	23
3.3.4 ขั้นตอนการทดสอบความแกร่ง.....	25
3.3.5 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	25
3.3.6 การทดสอบความแข็ง.....	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย.....	27

หน้า

4.1 คุณสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50.....	27
4.1.1 ส่วนผสมทางเคมี.....	27
4.1.2 ความแกร่งและความแข็ง.....	28
4.1.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค.....	28
4.2 ผลของรอบการเชื่อมเดี่ยว.....	29
4.2.1 ความแกร่งหลังจากผ่านรอบการเชื่อมเดี่ยว.....	29
4.2.2 ความแข็งหลังจากผ่านรอบการเชื่อมเดี่ยว.....	30
4.2.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านรอบการเชื่อมเดี่ยว.....	31
4.2.4 การเย็นตัวของรอบการเชื่อมเดี่ยวเทียบกับแผนภูมิการเย็นตัว	32
4.3 ผลของรอบการเชื่อมคู่.....	33
4.3.1 ความแกร่งหลังจากผ่านรอบการเชื่อมคู่.....	33
4.3.2 ความแข็งหลังจากผ่านรอบการเชื่อมคู่	34
4.3.3 การเย็นตัวของรอบการเชื่อมคู่เทียบกับแผนภูมิการเย็นตัว.....	36
4.3.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านรอบการเชื่อมคู่.....	37
4.4 ผลของรอบการเชื่อมหลายรอบ.....	38
4.4.1 ความแกร่งหลังจากผ่านรอบการเชื่อมหลายรอบ.....	38
4.4.2 ความแข็งหลังจากผ่านรอบการเชื่อมหลายรอบ.....	39
4.4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านรอบการเชื่อมหลายรอบ.....	40
4.4.4 การเย็นตัวของรอบการเชื่อมหลายรอบเทียบกับแผนภูมิการเย็นตัว	41
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	42
รายการอ้างอิง.....	43
ภาคผนวก.....	45
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	65

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50 ตามมาตรฐาน ASTM.....	3
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50	3
ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้า HSLA-100	10
ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมทางเคมี (% โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้า SQV-2A	12
ตารางที่ 2.5 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าที่ใช้ในการทดลองของ Y.LI และคณะ (%โดยน้ำหนัก)	14
ตารางที่ 2.6 ส่วนผสมทางเคมี (% โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้า Nb-V และ Nb-Mo	16
ตารางที่ 2.7 อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการจำลองรอบการเชื่อมของเหล็กกล้า Nb-V และ Nb-Mo....	16
ตารางที่ 3.1 สรุปลักษณะและจำนวนชิ้นงานเพื่อศึกษาผลของรอบการเชื่อมเดี่ยว	22
ตารางที่ 3.2 สรุปลักษณะและจำนวนชิ้นงานเพื่อศึกษาผลของรอบการเชื่อมคู่	23
ตารางที่ 3.3 สรุปลักษณะและจำนวนชิ้นงานเพื่อศึกษาผลของรอบการเชื่อมหลายรอบ	24
ตารางที่ 4.1 แสดงอักษรย่อของเฟสที่พบในบริเวณกระทบร้อน	27
ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมทางเคมี (% โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50 จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Emission spectrometer.....	27
ตารางที่ 4.3 ความแกร่งและความแข็งของเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50	28

สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 การเพิ่มความแข็งแรงให้กับเฟอร์ไรต์ด้วยสารละลายของแข็ง	5
รูปที่ 2.2 บริเวณย่อยภายใน HAZ ของเหล็กกล้าคาร์บอน (0.15 wt %C) โดยเทียบกับ แผนภูมิสมดุล Fe-Fe ₃ C	5
รูปที่ 2.3 แผนภูมิ CCT สำหรับรอยเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าธาตุผสมต่ำ แสดงถึงโครงสร้างจุลภาคที่เป็นไปได้ และผลของธาตุผสมต่อการเปลี่ยนแปลง ของผลิตภัณฑ์ที่เวลาการเย็นตัวค่าต่าง ๆ.....	8
รูปที่ 2.4 บริเวณต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในบริเวณที่เกรนโตของบริเวณกระทบร้อนด้วยการเชื่อม หลาย แนว (a) ตำแหน่งบริเวณย่อยเทียบกับเนื้อโลหะพื้น (Base metal, BM) และรอยเชื่อม (Weld metal, WM) (b) กราฟแสดงรอบการเชื่อมเทียบกับเส้น Ac ₃ และเส้น Ac ₁ (c) โครงสร้างที่บริเวณต่าง ๆ	9
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนออสเตนไนท์ที่เกิดก่อน (Prior austenite) กับอุณหภูมิสูงสุดและอัตราการเย็นตัว	10
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งเฉลี่ยกับอุณหภูมิสูงสุดและอัตราการเย็นตัว.....	11
รูปที่ 2.7 (a) และ (b) แสดงการจำลอง ICCGHAZ สำหรับรอบการเชื่อมคู่ (c) แสดงการจำลอง ICCGHAZ เพื่อศึกษาผลของ temper-bead สำหรับรอบการ เชื่อมหลายรอบ.....	12
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งบริเวณ ICCGHAZ กับอุณหภูมิสูงสุดของรอบ การเชื่อมที่สอง.....	13
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งกับอุณหภูมิสูงสุดของรอบการเชื่อมที่สาม.....	13
รูปที่ 2.10 ลักษณะรอบการเชื่อมคู่ที่จำลองเพื่อศึกษาผลของการเติม V และ Nb.....	14
รูปที่ 2.11 ผลของวานาเดียมและไนโอเบียมต่อ 50 J ITT ของ GC HAZ และ IC GC HAZ.....	15
รูปที่ 2.12 ผลของสัดส่วนพื้นที่ของเฟส M-A ต่อ อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงค่าความแกร่งที่ 50 J.....	15
รูปที่ 2.13 ผลของขนาดอนุภาค M-A ที่ใหญ่ที่สุดต่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงค่าความแกร่งที่ 50 J.....	15
รูปที่ 2.14 ความแกร่งบริเวณ HAZ ที่อุณหภูมิสูงสุดค่าต่าง ๆ.....	17
รูปที่ 2.15 ความแข็งเฉลี่ยแบบวิกเกอร์สที่อุณหภูมิสูงสุดค่าต่าง ๆ.....	17
รูปที่ 3.1 เครื่องจำลองการเชื่อมของ FUJI ELECTRONIC INDUSTRIAL CO.,LTD.....	18
รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมเทอร์โมคัปเปิล.....	18
รูปที่ 3.3 ผลของความไม่สม่ำเสมอของเนื้อเหล็กที่ผ่านการรีดร้อนต่อความแกร่ง.....	19

รูป	หน้า
รูปที่ 3.4 ขนาดชิ้นงานที่เตรียมเพื่อเข้าเครื่องจำลองการเชื่อม.....	20
รูปที่ 3.5 ลักษณะรอบการเชื่อมเพื่อศึกษามลของรอบการเชื่อมเดี่ยว	21
รูปที่ 3.6 ลักษณะรอบการเชื่อมเพื่อศึกษามลของรอบการเชื่อมคู่.....	22
รูปที่ 3.7 ลักษณะรอบการเชื่อมเพื่อศึกษามลของรอบการเชื่อมหลายรอบ.....	24
รูปที่ 3.8 ลักษณะขึ้นทดสอบความแกร่งแบบ Charpy impact ตามมาตรฐาน ASTM E23 – 96	25
รูปที่ 3.9 การตัดชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	26
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A 572 เกรด 50 ที่ผ่านการรีดร้อน กำลังขยาย 500 เท่า.....	28
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งที่ 25 °C กับเวลาการเย็นตัวที่อุณหภูมิสูงสุดต่าง ๆ...29	
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับเวลาการเย็นตัวที่อุณหภูมิสูงสุดต่าง ๆ.....	30
รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันร้อนซึ่งผ่านรอบการเชื่อมเดี่ยวที่ Tp = 1350°C 500 เท่า	31
รูปที่ 4.5 การเย็นตัวของรอบการเชื่อมเดี่ยวเทียบกับแผนภูมิ CCT ของเหล็ก HSLA VAN – 80.....	32
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งที่ 25°C กับอุณหภูมิสูงสุดของรอบการเชื่อมที่สอง เมื่อกำหนดให้ $\Delta t_{8/5(1)} = \Delta t_{8/5(2)} = 20$ s	33
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับอุณหภูมิสูงสุดของรอบการเชื่อมที่สอง เมื่อกำหนดให้ $\Delta t_{8/5(1)} = \Delta t_{8/5(2)} = 20$ s	35
รูปที่ 4.8 การเย็นตัวของรอบการเชื่อมคู่เมื่อ $\Delta t_{8/5(1)} = \Delta t_{8/5(2)} = 20$ s เทียบกับแผนภูมิ CCT ของ เหล็ก HSLA VAN-80.....	36
รูปที่ 4.9 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านรอบการเชื่อมคู่ เมื่อ Tp ₁ = 1350°C , $\Delta t_{8/5(1)}$ = $\Delta t_{8/5(2)} = 20$ s 500 เท่า	37
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งที่ 25 °C กับอุณหภูมิสูงสุดของรอบการเชื่อม ที่หนึ่ง	38
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับอุณหภูมิสูงสุดของรอบการเชื่อมที่หนึ่ง.....	39
รูปที่ 4.12 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านรอบการเชื่อมหลายรอบ 500 เท่า	40
รูปที่ 4.13 การเย็นตัวของรอบการเชื่อมหลายรอบ เมื่อ $\Delta t_{8/5} = 80$ s เทียบกับแผนภูมิ CCTของเหล็ก HSLA VAN – 80 ที่มีส่วนผสมใกล้เคียงกัน.....	41

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์หรือคำย่อ	ความหมาย
A	ออสเตนไนท์
AF	อซิควลาร์เฟอไรท์
B	เบนไนท์
$\Delta t_{8/5}$	เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวผ่านช่วงอุณหภูมิระหว่าง 800 ถึง 500 °C
F	เฟอไรท์
FS	ferrite with aligned secondary phases
GF	grain boundary ferrite
HAZ	บริเวณกระทบร้อน (heat – affected zone)
HV	ความแข็งหน่วยวิกเกอร์ส
M	มาร์เทนไซต์
P	เพิร์ลไลต์
PF	polygonal ferrite
s	เวลาหน่วยวินาที
Tp	อุณหภูมิสูงสุดของรอบการเชื่อม
WF	widmanstätten pattern