



การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงล้าของผิวเชื่อมพอกของเหล็กกล้าผสม

ต่ำ AISI 4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธี

การเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

Investigation of microstructure and fatigue strength of Manual Metal Arc

Welding (MMA), MIG/MAG and FCAW Resurfacing on

Low Alloy Steels AISI 4340

สุรัถยา ลิมนา

Surattaya Limna

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษิตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Materials Engineering

Prince of Songkla University

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงล้าของผิวเชื่อมพอกของ
เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์
กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

ผู้เขียน นางสาวสุรธยา ลีมนา
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชัย ปลูกผล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริกุล วิสุทธิเมธางกูร)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)

.....กรรมการ
(ดร.กนิษฐ์ ตะปะสา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้
สำหรับการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงล้าของผิวเชื่อมพอกของ เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

ผู้เขียน นางสาวสุรธยา ลีมนา

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

ปีการศึกษา 2552

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็น การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงล้าของ เนื้อเชื่อมพอกของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก /แมกและกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ซึ่งเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 เป็นเหล็ก กล้าที่เชื่อมยาก ความร้อนจากกระบวนการเชื่อมจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างจุลภาค โดยขึ้นทดสอบถูกให้ความร้อนก่อนเชื่อมที่อุณหภูมิ 350°C และให้ความร้อน หลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 550°C นาน 1 ชั่วโมง เพื่อลดความเค้นตกค้างในขึ้นทดสอบและหลีกเลี่ยง การเกิดโครงสร้างทางจุลภาคที่ไม่ต้องการ ขึ้นทดสอบจะเชื่อมด้วยกรรม การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวด เชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก /แมกและกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ตรวจสอบ ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน โดยใช้กล้อง จุลทรรศน์แบบใช้แสง และทดสอบความแข็งแรงล้าด้วยเครื่องทดสอบแบบคานหมุน ผลการศึกษา พบว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนเป็น โครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทน ไซต์ ส่วนโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมประกอบไปด้วยโครงสร้าง Acicular ferrite, Polygonal ferrite และ Side plate ferrite ซึ่งมีปริมาณที่แตกต่างไปในแต่ละกรรมวิธีการเชื่อม ค่าความแข็งแรง ล้าของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ให้ค่าความแข็งแรงล้าที่ดีที่สุด และมีค่าความแข็งแรงล้าต่ำกว่าเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 เล็กน้อย

Thesis Title Investigation of microstructure and fatigue strength of Manual Metal Arc Welding (MMA), MIG/MAG and FCAW Resurfacing on Low Alloy Steels AISI 4340

Author Miss Surattaya Limna

Major Program Materials Engineering

Academic Year 2009

ABSTRACT

This research is a study of microstructure and fatigue strength of Manual metal arc welding, MIG/MAG arc welding and Flux cored wire arc welding surface of low alloy steel AISI 4340. The heat from welding can cause structural changes of the microstructure. The specimens were preheated at 350 °C and post-weld heat treated at 550 °C for 1 hour to reduce residual stresses in the specimen and avoid unwanted microstructure. Microstructure observations were performed on optical microscopy (OM). A rotating bending machine was used to establish the fatigue strength. The results of this research indicated that the microstructure of heat affected zone all processes is tempered martenite and the microstructure of weld metal consisted of acicular ferrite, grain boundary ferrite, polygonal ferrite and sideplate ferrite. It has a different amount for each welding process. The fatigue strength revealed that the specimens using flux cored wire arc welding showed best fatigue strength and slightly less fatigue strength than low alloy steel AISI 4340 steel.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประภาศ เมืองจันทร์บุรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา รวมทั้งตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ปลูกผล และรองศาสตราจารย์ ดร. ศิริกุล วิสุทธิ์เมธางกูร ที่ให้ความรู้ คำแนะนำด้วยดี ตลอดจนกรุณามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ ดร.กนิษฐ์ ตะปะสา ที่กรุณาสละเวลามาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนการศึกษา

ขอขอบพระคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้งบประมาณอุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่านที่ได้ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์และให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบคุณบิดา มารดา และคนในครอบครัวทุกท่าน ที่เป็นกำลังใจ สนับสนุนและส่งเสริมการศึกษามาโดยตลอด

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชา วิศวกรรม เหมืองแร่และ วัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

สุรัถยา ลีมนา

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(9)
อักษรและสัญลักษณ์	(18)
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 ทฤษฎีและหลักการ	2
1.3 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	44
1.5 ขอบเขตการวิจัย	44
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	45
1.7 สถานที่ทำการวิจัย	45
บทที่ 2 วิธีการดำเนินการวิจัย	
2.1 วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	46
2.2 การเตรียมชิ้นงานเชื่อม	52
2.3 กรรมวิธีการเชื่อม	53
2.4 การเตรียมชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้า	55
2.5 วิธีทดสอบความแข็งแรงล้า	57
2.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	58
2.7 การวิเคราะห์หาปริมาณ โครงสร้างจุลภาค	59
2.8 การทดสอบความแข็ง	62
2.9 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยโดยสรุป	53

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	
3.1 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อม	64
3.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	66
3.3 ผลการตรวจสอบด้วยการถ่ายภาพรังสี	74
3.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงล้า	78
3.5 ผลการวิเคราะห์หน้าตัดขึ้นทดสอบความแข็งแรงล้า	84
3.6 ผลการทดสอบความแข็ง	88
บทที่ 4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
4.1 สรุปผลการทดลอง	92
4.2 ข้อเสนอแนะ	93
บรรณานุกรม	94
ภาคผนวก	
ก. คุณสมบัติของลวดเชื่อม	100
ข. เครื่องผสมแก๊ส	104
ค. ผลการทดสอบชนิดและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบใน inclusion ของเนื้อเชื่อม	107
ง. บริเวณที่ขึ้นทดสอบความล้าขาด	114
จ. ค่าทดสอบความแข็งของเนื้อเชื่อมหลายชั้น	121
ประวัติผู้เขียน	136

รายการตาราง

ตาราง	หน้า	
1.1	ปัญหาและวิธีการแก้ปัญหาในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำ	7
1.2	กลุ่มของเหล็กกล้าตามปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า	8
2.1	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340	46
2.2	คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340	47
2.3	ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมทั้ง 3 กระบวนการ	53
2.4	ค่าน้ำหนัก โมเมนต์ดัด และค่าความเค้นปกติ	58
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อม หุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์	65
3.2	ผลการตรวจสอบด้วยการถ่ายภาพรังสี	75
3.3	ค่าความเค้นกับจำนวนรอบที่เกิดความเสียหาย	78
3.4	ค่าคงที่ b และ c	84
ก 1	ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E11018-G H 4R	101
ก 2	คุณสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E11018-G H 4R	101
ก 3	ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม ER110S-G	102
ก 4	คุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อม ER110S-G	102
ก 5	ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E110T5-K4H4	103
ก 6	คุณสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E110T5-K4H4	103
จ 1	ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	122
จ 2	ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก	127
จ 3	ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมไร้ฟลักซ์	131

รายการรูป

รูปที่	หน้า	
1.1	กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	3
1.2	กระบวนการเชื่อมมิก/แมก	
	(a) กระบวนการเชื่อม	4
	(b) บริเวณเปลวอาร์คและบ่อหลอมละลาย	4
1.3	กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์	
	(a) กระบวนการเชื่อม	5
	(b) บริเวณเปลวอาร์คและบ่อหลอมละลาย	5
1.4	หน้าตัดลวดเชื่อม	
	(a) ลวดเชื่อมมิก/แมก	6
	(b) ลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์	6
1.5	แผนภาพการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องสำหรับเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน	11
1.6	กราฟการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องในการเชื่อมแสดงการเกิด โครงสร้างจุลภาค	11
1.7	โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมในเหล็กกล้าผสมต่ำ	12
1.8	โครงสร้าง Acicular ferrite เป็นส่วนใหญ่	13
1.9	โครงสร้าง Acicular ferrite และอนุภาคของ inclusion ในเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำและเหล็กกล้าคาร์บอน	13
1.10	แผนภาพผลกระทบการเพิ่มธาตุผสม เวลาในการเย็นตัวจาก 800-500 °C ปริมาณออกซิเจน และขนาดเกรนอสเทนไนท์	14
1.11	ผลกระทบของธาตุผสม ขนาดเกรนอสเทนไนท์ และปริมาณออกซิเจนต่อกราฟ CCT สำหรับเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำและเหล็กกล้าคาร์บอน	15
1.12	เส้นผ่านศูนย์กลางเกรนอสเทนไนท์กับปริมาณออกซิเจนในการเชื่อมใต้ฟลักซ์	16
1.13	ปริมาณ Acicular ferrite กับปริมาณออกซิเจนในแก๊สคลุมสำหรับการเชื่อมอาร์คใต้แก๊สคลุม	16

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
1.14	ค่าความเหนียว Charpy V-notch กับสัดส่วนโดยปริมาตรของโครงสร้าง acicular ferrite ในการเชื่อมใต้ฟลักซ์	17
1.15	ผลกระทบของ Constitutional supercooling ต่อลักษณะการเย็นตัวในระหว่างการเย็น	
(a)	Planar	18
(b)	Cellular	18
(c)	Columnar dendritic	18
(d)	Equiaxed dendritic	18
1.16	การเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน	
(a)	บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน	20
(b)	เฟสไดอะแกรม	20
1.17	การเปรียบเทียบกระบวนการเชื่อมและกระบวนการทางความร้อน	
(a)	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ	20
(b)	เฟสไดอะแกรมของ Fe-C	20
1.18	บริเวณต่าง ๆ ของแนวเชื่อมชั้นเดียว	22
1.19	บริเวณต่าง ๆ ที่เกิดในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนของเหล็กกล้าคาร์บอน ประมาณ 0.15%C	22
1.20	การทับกันบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากบริเวณเปราะ (localized brittle zones; LBZ) ไปยังเส้นหลอมละลาย	23
1.21	กระบวนการเชื่อมซ่อมสองชั้น	
(a)	พื้นที่ที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนของแนวเชื่อมชั้นเดียว	24
(b)	ชั้นแรกเป็นทำให้เกิดบริเวณเกรนหยาบไปฟอร์มในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนของโลหะเดิม	24
1.22	ลักษณะของภาวะวิฤจักร	26
1.23	ผลของโครงสร้างจุลภาคต่อขีดจำกัดความทนทาน	27
1.24	S-N Curve	28

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
1.25 ความสัมพันธ์ระหว่างขีดจำกัดความทนทาน (S_c) กับค่าความแข็งแรงดึง (S_{uc})	30
1.26 ผิวหน้าการชำรุดแบบต่าง ๆ	32
1.27 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล	37
1.28 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์	38
1.29 การทดสอบความแข็งแบบรีอคเวล	38
1.30 ผลของปริมาณแมกนีเซียมในเนื้อเชื่อมซึ่งสัมพันธ์กับจำนวน โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้น	40
2.1 เครื่องเชื่อม	48
2.2 เครื่องผสมแก๊ส	48
2.3 เครื่องขัดชิ้นงาน	49
2.4 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	50
2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	50
2.6 เครื่องทดสอบความล้าแบบคานหมุน	51
2.7 เครื่องทดสอบความแข็ง	51
2.8 ชิ้นงานก่อนการเชื่อมพอก	
(a) ด้านบน	52
(b) ด้านหน้า	52
2.9 ขนาดชิ้นงานก่อนการเชื่อมพอก	
(a) ด้านข้าง	52
(b) ด้านหน้า	52
2.10 กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	54
2.11 กรรมวิธีการเชื่อมด้วยกระบวนการมิก/แมก และกระบวนการเชื่อมไส้ฟลักซ์เป็น การเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ	54
2.12 ชิ้นงานเชื่อมพอก	
(a) ชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้ว	55
(b) แบบจำลองแนวเชื่อม	55

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.13	บริเวณที่ตัดเนื้อเชื่อมพอกนำไปเตรียมขึ้นทดสอบความแข็งแรงล้า	55
2.14	เนื้อเชื่อมพอกก่อนนำไปเตรียมขึ้นทดสอบความแข็งแรงล้า	56
2.15	ขนาดขึ้นทดสอบความแข็งแรงล้า	56
2.16	ขึ้นทดสอบความแข็งแรงล้า	56
2.17	การจัดขึ้นทดสอบก่อนทดสอบความแข็งแรงล้า	57
2.18	ชิ้นงานเชื่อมที่ตัดไปทดสอบโครงสร้างจุลภาค	58
2.19	การจัดชิ้นงานด้วยผงอลูมินา	59
2.20	โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 500 เท่า	60
2.21	โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมที่ประกอบไปด้วยโครงสร้าง Acicular ferrite และ โครงสร้าง Sideplate ferrite	60
2.22	โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมที่เหลือเฉพาะโครงสร้าง Acicular ferrite	61
2.23	โครงสร้าง Polygonal (สีขาว) โครงสร้าง Acicular ferrite และ Sideplate ferrite (สีดำ)	61
2.24	โครงสร้าง Polygonal และ Sideplate ferrite (สีขาว) โครงสร้าง Acicular ferrite (สีดำ)	62
2.25	แนวการวัดค่าความแข็ง	62
2.26	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยโดยย่อ	63
3.1	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ที่ผ่านการ Quenched และ Tempered	63
3.2	โครงสร้างจุลภาคบริเวณเส้นหลอมละลาย	
(a)	MMA	67
(b)	MAG	67
(c)	FCAW	67
3.3	โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน	
(a)	MMA	68
(b)	MAG	68
(c)	FCAW	68

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.4	โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม	
(a)	MMA	69
(b)	MAG	69
(c)	FCAW	69
3.5	สัดส่วนของโครงสร้างจุลภาคแต่ละชนิดกับกรรมวิธีการเชื่อม	70
3.6	โครงสร้างจุลภาคของ เฟสภายในเนื้อเชื่อม ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (MMA)	71
3.7	ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน เฟสภายในเนื้อเชื่อม ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	72
3.8	โครงสร้างจุลภาคของ เฟสภายในเนื้อเชื่อม ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก (MIG/MAG)	72
3.9	ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน เฟสภายในเนื้อเชื่อม ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก	73
3.10	โครงสร้างจุลภาคของ เฟสภายในเนื้อเชื่อม ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์	73
3.11	ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน เฟสภายในเนื้อเชื่อม ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์	74
3.12	ฟิล์มถ่ายภาพขั้นตอนทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MMA ชั้นที่ 1-3	75
3.13	ฟิล์มถ่ายภาพขั้นตอนทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MMA ชั้นที่ 4-6	76
3.14	ฟิล์มถ่ายภาพขั้นตอนทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ชั้นที่ 1-3	76
3.15	ฟิล์มถ่ายภาพขั้นตอนทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ชั้นที่ 4-6	76
3.16	ฟิล์มถ่ายภาพขั้นตอนทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ชั้นที่ 7-8	76
3.17	ฟิล์มถ่ายภาพขั้นตอนทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม FCAW ชั้นที่ 1-3	77
3.18	ฟิล์มถ่ายภาพขั้นตอนทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม FCAW ชั้นที่ 4-6	77
3.19	ฟิล์มถ่ายภาพขั้นตอนทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม FCAW ชั้นที่ 7-8	77

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.20	กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้า AISI 4340 ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	79
3.21	กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้า AISI 4340 ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก	79
3.22	กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้า AISI 4340 ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์	80
3.23	กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับอายุของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340	80
3.24	กราฟเปรียบเทียบความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมที่ได้จากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมไส้ฟลักซ์ และเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340	81
3.25	กราฟเปรียบเทียบความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมที่ได้จากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก กรรมวิธีการเชื่อมไส้ฟลักซ์ เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 และเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ที่มาจากการทดลองของ G. Magudeeswaran et al	83
3.26	ผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าที่เตรียมจากเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ที่ความเค้น 400 MPa (15x)	85
3.27	ผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ที่ความเค้น 400 MPa (15x)	85
3.28	ผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมมิก/แมก ที่ความเค้น 400 MPa (15x)	86
3.29	ผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมไส้ฟลักซ์ ที่ความเค้น 400 MPa (15x)	86
3.30	โครงสร้างรอยบุ๋ม (dimple) บริเวณรอยแตก overload ของชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมมิก/แมก (2000x)	87

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับระยะทางของเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ 88
3.32	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับระยะทางของเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก 89
3.33	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับระยะทางของเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ 89
3.34	กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งของแต่ละกรรมวิธีการเชื่อม 90
ค1	โครงสร้างของ inclusion ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (MMA-1) 108
ค2	ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน inclusion ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (MMA-1) 108
ค3	โครงสร้างของ inclusion ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (MMA-3) 109
ค4	ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน inclusion ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (MMA-3) 109
ค5	โครงสร้างจุลภาคของ inclusion ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก (MIG/MAG-2) 110
ค6	ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน inclusion ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก /แมก (MIG/MAG-2) 110
ค7	โครงสร้างจุลภาคของ inclusion ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก (MIG/MAG-3) 111
ค8	ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน inclusion ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก /แมก (MIG/MAG-3) 111
ค9	โครงสร้างจุลภาคของ inclusion ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW-1) 112

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
ค10	ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน inclusion ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วย	112
	กรรมวิธีการเชื่อมลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW-1)	
ค11	โครงสร้างจุลภาคของ inclusion ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมลวด	113
	เชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW-2)	
ค12	ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน inclusion ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วย	113
	กรรมวิธีการเชื่อมลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW-2)	
ง1	ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MMA ทดสอบที่ 350 MPa	115
ง2	ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MMA ทดสอบที่ 400 MPa	115
ง3	ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ทดสอบที่ 400 MPa ชั้นที่ 1	115
ง4	ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ทดสอบที่ 400 MPa ชั้นที่ 2	115
ง5	ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ทดสอบที่ 400 MPa ชั้นที่	116
ง6	ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม FCAW ทดสอบที่ 400 MPa ชั้นที่ 1	116
ง7	ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ทดสอบที่ 400 MPa ชั้นที่ 1	116
ง8	ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ทดสอบที่ 400 MPa ชั้นที่ 2	116
ง9	ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ทดสอบที่ 500 MPa ชั้นที่ 1	117
ง10	ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม FCAW ทดสอบที่ 500 MPa ชั้นที่ 1	117
ง11	ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MMA ทดสอบที่ 600 MPa ชั้นที่ 1	117
ง12	ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MMA ทดสอบที่ 600 MPa ชั้นที่ 2	117
ง13	ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ทดสอบที่ 600 MPa ชั้นที่ 1	118
ง14	ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ทดสอบที่ 600 MPa ชั้นที่ 1	118
ง15	ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ทดสอบที่ 600 MPa ชั้นที่ 1	118
ง16	ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ทดสอบที่ 600 MPa ชั้นที่ 2	118
ง17	ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MMA ทดสอบที่ 700 MPa ชั้นที่ 1	119

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง18	ชั้นทดสอบความแข็งแรงกล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ทดสอบที่ 700 MPa ชั้นที่ 1 119
ง19	ชั้นทดสอบความแข็งแรงกล้าจากเนื้อเชื่อม FCAW ทดสอบที่ 700 MPa ชั้นที่ 1 119
ง20	ชั้นทดสอบความแข็งแรงกล้าเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ทดสอบที่ 700 MPa ชั้นที่ 1 119
ง21	ชั้นทดสอบความแข็งแรงกล้าจากเนื้อเชื่อม FCAW ทดสอบที่ 800 MPa 120
ง22	ชั้นทดสอบความแข็งแรงกล้าเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ทดสอบที่ 800 MPa 120

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A	กระแสดเชื่อม
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
CCT	Continuous cooling transformation diagram
CE_{nw}	Carbon equivalent
C	Carbon
Cu	Copper
Cr	Chromium
Co	Cobalt
FCAW	Flux Cored Wire Arc Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
HAZ	Heat affected zone
HB	Brinell hardness
HV	Vickers hardness
kgf	Kilogram force
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
MMA	Manual Metal Arc Welding
Mn	Manganese
MPa	Megapascal
Mo	Molybdenum
Nb	Niobium
Ni	Nickel
P	Phosphorus
S	Sulfur
Si	Silicon
Sn	Tin

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

Ti	Titanium
V	Vanadium
W	Tungsten
Zn	Zinc
μm	micrometer
$\Delta_{t_{8-5}}$	เวลาในการเย็นตัวจากอุณหภูมิ 800 ถึง 500 °C
γ	ออสเทนไนต์
$\Delta\sigma$	พิสัยของความเค้น
R	อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่ำสุดและสูงสุด
σ_a	แอมพลิจูดของความเค้น
σ_{max}	ความเค้นที่ภาระสูงสุด
σ_{mean}	ความเค้นเฉลี่ย
σ_{min}	ความเค้นที่ภาระต่ำสุด

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมได้มีการใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมซีเมนต์ และอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า เป็นต้น โดยเฉพาะฝ่ายการผลิตเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ในแต่ปีมีปริมาณความต้องการอะไหล่เป็นจำนวนมาก เช่น swing shaft, shipper shaft, drive shaft, spline shaft เป็นต้น ซึ่งอะไหล่เหล่านี้ผลิตมาจากเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steels) ที่มีค่าความแข็งแรงดึง (Ultimate Tensile Strength) สูงประมาณ 1,200-1,300 MPa และยังมีค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) สูงสามารถรับภาระพลวัต (Dynamic Load) ได้ดี

เครื่องจักรเหล่านี้หลังจากผ่านการใช้งานจนครบรอบบำรุงรักษา จะมีการหยุดการทำงานเพื่อตรวจสอบก่อนการใช้งานในรอบต่อไป พบว่าอะไหล่จำนวนมากเกิดชำรุดอย่างรุนแรงหรือมีรอยแตกร้าวจาก ความล้า (Fatigue crack) ทำให้ต้องนำเข้าสู่กระบวนการซ่อมบำรุง ซึ่งเกิดการสูญเสียค่าใช้จ่ายในการจัดหาอะไหล่เข้ามาทดแทนและส่งผลกระทบต่อต้นทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้าของประเทศอีกด้วย อีกทั้งยังเป็นส่วนทำให้ต้องสูญเสียเงินตราต่างประเทศ เนื่องจากอะไหล่เหล่านี้ต้องนำเข้ามาจากประเทศผู้ผลิตเครื่องจักร

การบำรุงรักษาเพื่อทดแทนการซื้ออะไหล่ใหม่และยืดอายุการใช้งาน จะนำอะไหล่ที่เกิดการชำรุดเข้าสู่กระบวนการเชื่อมซ่อม (Welding Repair Process) โดยกรรมวิธีการเชื่อมพอก (Welding Resurfacing or Build-Up) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ถูกเลือกใช้ในการซ่อมผิวอะไหล่ที่เกิดการสึกหรออย่างรุนแรงหรือเกิดการแตกร้าวจากการล้า เนื่องจากประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อมพอกจะให้สมบัติใกล้เคียงกับชิ้นส่วนเดิม และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เมื่อเทียบกับราคาของอะไหล่ใหม่

โดยทั่วไปจะใช้กรรมวิธีการเชื่อมพอกผิวโดยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Manual Metal Arc Welding; MMA) ซึ่งในกรณีที่รับภาระปกติ พบว่าอายุของ

ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมได้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่ในกรณีที่รับภาระไม่ปกติ เช่น ใช้งานเกินภาระกำหนด (Over Capacity) ใช้งานผิดวิธี (Misoperation) หรืออุบัติเหตุจากการทำงาน พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมีอายุการใช้งานสั้นเมื่อเทียบกับอะไหล่ที่ไม่ผ่านการเชื่อม เนื่องจากการเชื่อมโดยวิธีการเชื่อมจะถูกจำกัดด้วยความแข็งแรงของเนื้อเชื่อม กระบวนการเชื่อม (Welding Processes) และเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคเนื่องจากความร้อนจากการเชื่อม

จากข้อมูลและเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงเป็นที่มาของโครงการวิจัยนี้ โดยจะศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงดัดของเนื้อเชื่อม (Weld Metal) เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 โดยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Manual Metal Arc Welding; MMA) กระบวนการเชื่อมโดยใช้ก๊าซปกคลุมแบบมิก/แมก (MIG/MAG, Metal Inert Gas/Metal Active Gas) และกระบวนการเชื่อมโดยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Wire Arc Welding; FCAW) เพื่อทราบโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมจากแต่ละกรรมวิธีการเชื่อม ซึ่งจะส่งผลไปถึงความแข็งแรงดัด และนำผลมาปรับปรุงเพื่อเลือกใช้กรรมวิธีการเชื่อมเชื่อมที่เหมาะสมในการเชื่อมเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340

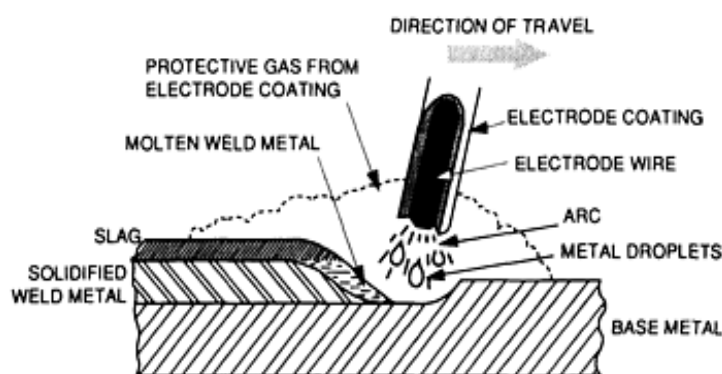
1.2 ทฤษฎีและหลักการ

1.2.1 กระบวนการเชื่อม

การเชื่อมเป็นกระบวนการหนึ่งในการจับยึดโลหะ (Metal joining) โดยหลักการส่งถ่ายน้ำโลหะ ผลจากการอาร์คระหว่างชิ้นงานกับปลายลวดเชื่อม ทำให้ชิ้นงานหลอมละลายและการเพิ่มเนื้อโลหะเติมลงในแอ่งหลอมละลายของ ชิ้นงาน ที่หลอมเหลว เมื่อเย็นตัวรอยต่อจะมีความแข็งแรง เพื่อให้เกิดรอยเชื่อม แหล่งพลังงานที่นำมาใช้ในการเชื่อม มีหลายแหล่ง เช่น การใช้ความร้อนจากเปลวแก๊ส การอาร์คโดยใช้กระแสไฟฟ้า ลำแสงเลเซอร์ การใช้ไอเล็คตรอนบีม การเสียดสี การใช้คลื่นเสียง เป็นต้น กรรมวิธีการเชื่อมในปัจจุบันมีหลายกรรมวิธี แต่ ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กระบวนการเชื่อมมิก/แมก และกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ [1,2]

กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Manual Metal Arc welding; MMA) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย ที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีต เนื่องจากสามารถทำงานได้ง่าย อุปกรณ์ราคาถูก แต่ต้องใช้เวลาและความชำนาญและความสามารถเฉพาะตัวของช่างเชื่อมสูง เวลาในการดำเนินการนาน และต้องมีการควบคุมปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดจาก

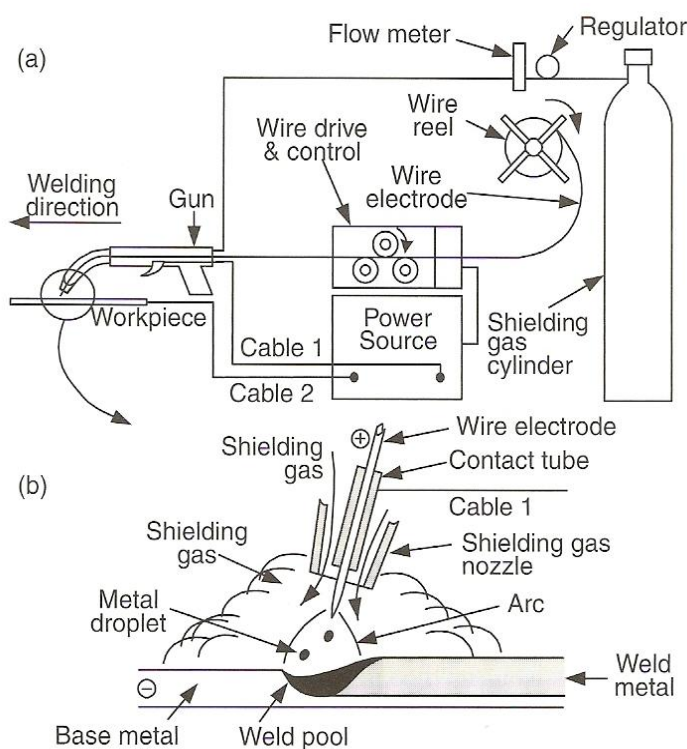
ฟลักซ์อย่างเคร่งครัด เพราะมีผลต่อการแตกตัวของเนื้อเชื่อมและ โดยเฉพาะบริเวณได้รับผลกระทบทางความร้อน ลวดเชื่อมซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแกนโลหะหุ้มด้วยสารพอกหุ้ม การเชื่อมจะเริ่มต้นด้วยการจุดอาร์คระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ความร้อนที่ได้จากการอาร์คก็จะทำให้โลหะและลวดเชื่อมหลอมละลาย สารพอกหุ้มก็จะทำให้เกิดสแลก (Slag) ปกคลุมแนวเชื่อม [2,3] ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ที่มา: [4]

กระบวนการเชื่อมมิก/แมก (Metal Inert Gas Welding/Metal Active Gas Arc welding; MIG/MAG) เป็นกระบวนการเชื่อมที่นิยมกันอย่างมากในปัจจุบัน บางครั้งสามารถนำมาทดแทนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ เนื่องจาก สามารถเชื่อมโลหะต่าง ๆ ได้หลายชนิด กระบวนการเชื่อมมิก/แมกได้พัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง ทำให้ "สามารถเชื่อมได้ทั้งชนิดที่ควบคุมการเชื่อมด้วยมือและด้วยระบบอัตโนมัติ โดยที่ MIG ย่อมาจาก Metal Inert Gas ส่วน MAG ย่อมาจาก Metal Active Gas โดยทางอเมริกันจะเรียกการเชื่อมแบบนี้ว่า การเชื่อม GMAW ซึ่งย่อมาจาก Gas Metal Arc Welding การเชื่อมมิก (MIG) จะใช้แก๊สเฉื่อย (Inert Gas) เป็นแก๊สคลุม เช่น แก๊สอาร์กอน (Argon) หรือแก๊สฮีเลียม (Helium) ส่วนการเชื่อมแมกจะใช้แก๊สที่ทำปฏิกิริยา (Active Gas) เป็นแก๊สคลุม เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หรือแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊สอาร์กอน เป็นต้น การอาร์คจะเกิดบริเวณระหว่างปลายลวดเชื่อมกับชิ้นงานภายใต้แก๊สคลุม โดยที่ลวดเชื่อมเป็นเส้นลวดโลหะตันทำหน้าที่เป็นทั้งอิเล็กโทรด และตัวเติมเนื้อเชื่อม (Filler) ถูกป้อนโดยชุดป้อนลวด (Wire Feeder) เข้าสู่บ่อหลอมละลายอย่างต่อเนื่อง และหลอมละลายรวมกับชิ้นงานรวมตัวเป็นเนื้อเชื่อม ในขณะที่เชื่อมจะมีแก๊สไหลคลุมบ่อหลอมละลายตลอดเวลา [3,5] ดังรูปที่ 1.2

กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Wire Arc Welding: FCAW) ปรากฏขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1920 ซึ่งใช้เชื่อมพอกผิวแข็งเพื่อป้องกันการสึกหรอ (Wear resistant hardfacing) กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โดยทั่วไปจะเหมือนกับกระบวนการเชื่อมมิก/แมก แต่ลวดเชื่อมมีฟลักซ์บรรจุอยู่ภายในแทนที่จะเป็นลวดตัน โดยการใส่ผงฟลักซ์ที่เป็นธาตุผสม (Alloying constituents) ในแกนของลวดเชื่อมโลหะ ซึ่งฟลักซ์เหล่านี้ก็จะเหมือนกับฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อมในการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ จะทำหน้าที่ป้องกันบ่อหลอมสัมผัสกับอากาศ หลักการเชื่อมด้วยลวดไส้ฟลักซ์โดยทั่วไปจะเหมือนกับกระบวนการเชื่อมมิก/แมก ดังรูปที่ 1.3 แตกต่างที่ลวดเชื่อมเป็นลวดเชื่อมตัน (Solid wire) [3,6] ดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.2 กระบวนการเชื่อมมิก/แมก (a) กระบวนการเชื่อม (b) บริเวณเปลวอาร์คและบ่อหลอมละลาย ที่มา: [5]

1.2.2 ความร้อนที่ใส่เข้าไปในการเชื่อม (Heat input) [3]

ขบวนการเชื่อมเกือบทั้งหมดต้องการความร้อน หรือความดัน เพื่อให้เกิดการเชื่อมติดกัน ดังนั้นความร้อนที่ใส่เข้าไปในการเชื่อมมีความสำคัญมาก จะเป็นตัวกำหนดอัตราการเย็นตัวของเนื้อเชื่อมและบริเวณใกล้เคียง ซึ่งมีสูตรในการหาความร้อนที่ใส่เข้าไป ดังนี้

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot 60}{1000V} \text{Efficiency} \quad (1.1)$$

โดยที่ Q = ความร้อนที่ใส่เข้าไป (kJ/mm)
 U = แรงดัน (v)
 I = กระแส (A)
 V = ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)

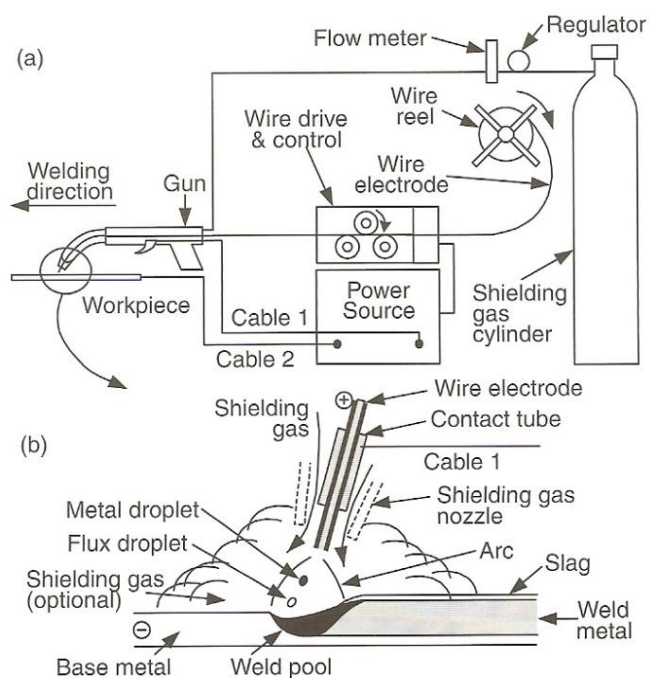
Efficiency : MMA = 0.75

MIG/MAG = 0.90

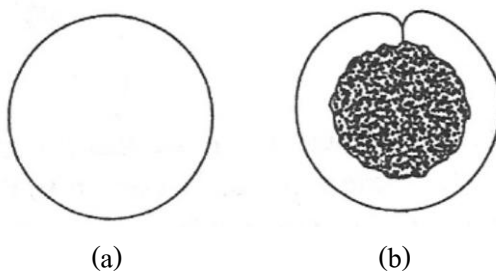
SAW = 0.90

TIG = 0.80

ค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) มีค่าใกล้เคียงสมการคำนวณทางฟิสิกส์ จะต้องมีการตรวจสอบในกรณีที่มีโอกาสมีการใช้ค่าอื่นของแต่ละบริษัท



รูปที่ 1.3 กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมใส่ฟลักซ์ (a) กระบวนการเชื่อม (b) บริเวณเปลวอาร์ค และบ่อหลอมละลาย ที่มา: [6]



รูปที่ 1.4 หน้าตัดลวดเชื่อม (a) ลวดเชื่อมมิก/แมก (b) ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ที่มา: [3]

1.2.3 ความสามารถในการเชื่อม (Weldability of Steel)

1.2.3.1 ปัญหาในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำ

ส่วนใหญ่เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำจะได้รับความนิยมในการเชื่อมมากกว่าโลหะชนิดอื่น ๆ เนื่องจากเหล็กกล้าทั้งสองชนิดมีการใช้อย่างแพร่หลายและความสามารถในการเชื่อม (Weldability) ดี โดยทั่วไปเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำที่มีความแข็งแรง (strength) สูง จะมีความสามารถในการเชื่อมต่ำ เพราะว่าจะเสี่ยงต่อการเกิดการแตกเนื่องจากไฮโดรเจน (Hydrogen Cracking) [7] ตารางที่ 1.1 สรุปปัญหาในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำ และวิธีแก้ปัญหา

1.2.3.2 ปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า (Carbon Equivalent)

เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการแตกร้าวขณะเชื่อม ปริมาณคาร์บอนเทียบเท่าซึ่งจะเป็นตัวแสดงความสามารถในการเชื่อมและความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กกล้า ซึ่งเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนและหลังการเชื่อม The International Institute of Welding ได้กำหนดสมการปริมาณคาร์บอนเทียบเท่าจากส่วนผสมทางเคมีไว้ ดังนี้

$$CE_{iw} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{5} + \frac{V}{5} \quad (1.2)$$

ความเข้มข้นของธาตุผสมเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสมการ 1.2 ซึ่งคาร์บอนเป็นธาตุที่มีผลมากที่สุดต่อความสามารถในการเชื่อมพร้อมทั้งธาตุผสมอื่น ๆ คาร์บอนอาจจะมีผลต่อช่วงอุณหภูมิการแข็งตัว ความไวต่อการแตกร้อน ความสามารถในการชุบแข็ง และพฤติกรรมของการแตกเย็นของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้า ผลการวิจัยของ Weld Technology Institute of Australia ได้แบ่งกลุ่มเหล็กออกเป็น 12 กลุ่ม ตามการคำนวณค่าปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า [8] ดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.1 ปัญหาและวิธีการแก้ปัญหาในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำ [7]

ปัญหา	Alloy Types	การแก้ปัญหา
รูพรุน (Porosity)	เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำ	เพิ่ม deoxidizers (Al, Ti, Mn) ในลวดเชื่อม
การแตกเนื่องจากไฮโดรเจน (Hydrogen cracking)	Steel with high carbon equivalent	ใช้ลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำหรือลวดเชื่อม Austenitic stainless steel
Lamellar tearing	เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำ	Use joint designs that minimize transverse restraint. Butter with a softer layer.
Reheat cracking	Corrosion and heat resisting steel	ใช้ความร้อนในการเชื่อมต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงการเติบโตของเกรน ควบคุมความเค้นตกค้างต่ำ
Solidification cracking	เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำ	Keep proper Mn/S ration
Low HAZ toughness due to grain growth	เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำ	ใช้การฟอร์มคาร์ไบด์และ nitride ยับยั้งการเติบโตของเกรน ใช้ความร้อนในการเชื่อมต่ำ
Low fusion-zone toughness due to coarse columnar grains	เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำ	Grain refining ใช้การเชื่อมหลายชั้นในการทำให้เกรนละเอียด

การใช้คาร์บอนเทียบเท่าที่ได้จากการทดลองของ The International Institute of Welding ประสบความสำเร็จสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำและเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าที่มีค่าคาร์บอนเทียบเท่าต่ำจะให้ความสามารถในการเชื่อมดี เมื่อค่าคาร์บอนเทียบเท่าของเหล็กน้อยกว่า 0.45% การแตกร้าวจากการเชื่อมน่าจะไม่มีเกิดขึ้นและไม่ต้องการกระบวนการทางความร้อน เมื่อค่าคาร์บอนเทียบเท่าอยู่ในช่วง 0.45-0.60% อาจเกิดรอยแตกและต้องการความร้อนก่อนเชื่อมที่อุณหภูมิประมาณ 95-400°C แต่เมื่อค่าคาร์บอนเทียบเท่าของเหล็กกล้าสูงกว่า 0.60% มีโอกาสจะ

เกิดรอยแตกและต้องการความร้อนก่อนเชื่อมและหลังเชื่อม เมื่อปริมาณคาร์บอนเทียบเท่าของ เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 เท่ากับ 0.87 ซึ่งอยู่ในกลุ่มที่เชื่อมยากมาก

ตารางที่ 1.2 กลุ่มของเหล็กกล้าตามปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า [8]

กลุ่มที่	ปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า	ความยากในการเชื่อม
1	<0.30	ง่ายมาก
2	0.30-0.35	↓
3	0.35-0.40	
4	0.40-0.45	
5	0.45-0.50	
6	0.50-0.55	
7	0.55-0.60	
8	0.60-0.65	
9	0.65-0.70	
10	0.70-0.75	
11	0.75-0.80	
12	>0.80	

1.2.3.3 ความแข็งที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (Hardness at HAZ) [8]

ความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กกล้าขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีซึ่งคาร์บอนเป็นตัวสำคัญและธาตุอื่น ๆ ที่ผสมอยู่เป็นตัวเสริม ซึ่งจะปรากฏที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน คือ ค่าความแข็งที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจะสูง เสี่ยงต่อการแตกร้าว หลังจากการเชื่อม เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนและผลการแทรกตัวของไฮโดรเจนจึงได้กำหนดค่าความสามารถในการเชื่อม คือ ความสามารถในการเชื่อมได้ยากหรือง่ายของเหล็กกล้า โดยกำหนดค่าคาร์บอนเทียบเท่า ดังนั้น ถ้ามีค่าสูงจะเป็นเหล็กที่เชื่อมได้ยาก ค่าต่ำ ๆ จะเชื่อมได้ง่าย

ในกรณีที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนมีโครงสร้างจุลภาคเป็นมาเทนไซต์ (HV_M) และเบนไนท์ (HV_B) ซึ่งในปี พ.ศ. 2552 K. Lorenz และ C.Duren ได้แสดงความสัมพันธ์ของความแข็งสูงสุดที่เกิดบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ดังนี้

สำหรับมาเทนไซต์ 100%

$$HV_M = 802C + 305 \text{Vicker} \quad (1.3)$$

สำหรับเบนไนท์ 100%

$$HV_B = 350\left(C + \frac{Si}{11} + \frac{Mn}{8} + \frac{Cu}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{17} + \frac{Mo}{6} + \frac{V}{3}\right) + 101 \quad (1.4)$$

ในปีเดียวกัน N. Yurioka ได้เสนอการหาค่าความแข็ง สำหรับมาเทนไนท์ 100% ดังนี้

$$HV_M = 844C(1 + 0.03C^2) + 294 \quad (1.5)$$

1.2.4 กระบวนการทางความร้อนในกระบวนการเชื่อม (Welding Heat Treatment Process) [8]

จากเหตุผลของความสามารถในการชุบแข็งและความสามารถในการเชื่อม เพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าว จึงใช้กระบวนการทางความร้อนเข้าช่วย เช่น การอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม (Preheat) และการให้ความร้อนหลังเชื่อม (Post weld Heat Treatment)

1.2.4.1 การอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม (Preheat)

เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดมาร์เทนไนท์ที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนซึ่งจะเสี่ยงต่อการแตกร้าวและเพื่อให้เหล็กมีการขยายตัวรองรับ Restraint ลดการเกิด Distortion และ Residual Stress ที่จะเกิดขึ้น เหล็กที่มีค่าคาร์บอนเทียบเท่า น้อยกว่า 0.2 ไม่จำเป็นต้องอุ่น และยังทำให้เหล็กเย็นช้าลง

(1) อุณหภูมิที่ต้องอุ่นต้องสูงกว่าอุณหภูมิที่เหล็กเกิดโครงสร้างมาร์เทนไนท์ ประมาณ 10°C โดยต้องรู้อุณหภูมิของเหล็กกล้าที่จะเชื่อม ซึ่งหาได้จาก Isothermal Transformation Diagram หรือ TTT Curve ของเหล็กกล้าแต่ละชนิด

(2) ในการเลือกใช้วิธีในข้อ (1) ยังไม่เพียงพอสำหรับเหล็กหลาย ๆ ชนิด และบางชนิดไม่สามารถหา TTT Curve ได้ จึงได้มีการศึกษาและทดลองวิจัย โดยนำค่าความสามารถในการชุบแข็งและค่าคาร์บอนเทียบเท่ามาเป็นตัวแปร และยังคำนึงถึงความหนาของวัสดุด้วย เนื่องจากจะเป็นตัวเก็บและถ่ายเทความร้อนออกจากชิ้นงาน

(3) หาได้จากมาตรฐานการเชื่อม เช่น AWS D1.1 Structural Welding Code Steels ซึ่งได้กำหนดค่าความแข็งของบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนไว้ โดยการควบคุมอุณหภูมิที่จะไม่ทำให้บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนแข็งจนเป็นอันตราย (Critical Hardness)

1.2.4.2 การให้ความร้อนขณะเชื่อมเพื่อรักษาอุณหภูมิ (Interpass Temperature) เป็นการให้ความร้อนขณะเชื่อมเพื่อไม่ให้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดมาร์เทนไซต์ และไม่เกินอุณหภูมิอบคืนตัว

1.2.4.3 การให้ความร้อนหลังเชื่อม (Post weld Heat Treatment) คือ การให้ความร้อนหลังเชื่อม โดยมีวัตถุประสงค์ คือ ลดความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ลดความแข็งบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ไล่ไฮโดรเจน และเพิ่มความเหนียวให้เนื้อเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน

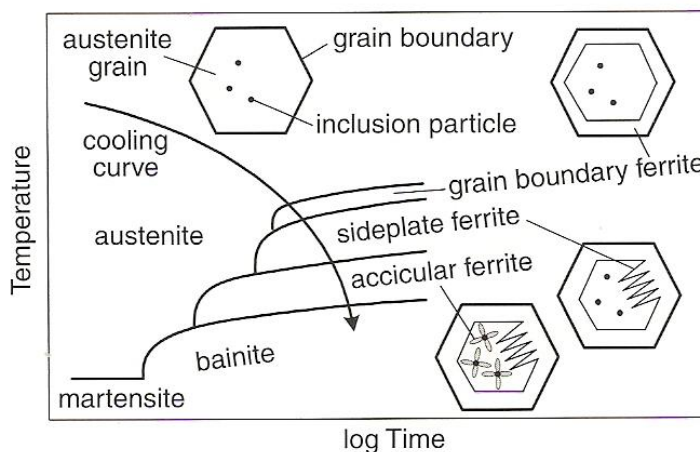
1.2.5 การเปลี่ยนโครงสร้างอสเทนไนต์เป็นเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าผสมต่ำ (Austenite to ferrite transformation in low-carbon, low-alloy steel welds)

1.2.5.1 การเกิดโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Development)

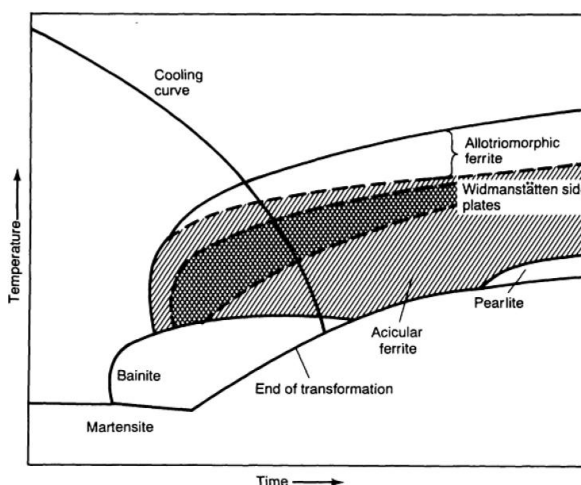
เดนไดรต์ (dendrites) หรือเซลล์ (cells) ในเนื้อเชื่อมส่วนใหญ่ไม่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน ประการแรก การแบ่งตัวถูกละลายจะไม่เกิดขึ้นในระหว่างการแข็งตัวถ้าอัตราการแบ่งตัว (k) เข้าใกล้ 1 ไมโครเซกรีเกชัน (Microsegregation) ซึ่งเซกรีเกชัน (segregation) จะกลายเป็นบริเวณอินเตอร์เดนไดรต์ติก (interdendritic) หรืออินเตอร์เซลล์ลูลา (intercellular) ส่งผลมาจากเนื้อเชื่อมกลายเป็นโครงสร้างเดนไดรต์หรือเซลล์เล็กน้อยภายในเกรน ถึงแม้ว่าโครงสร้างภายในเกรนสามารถลดลงอย่างชัดเจน ประการที่สอง ถ้าการแพร่ในสถานะของแข็งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ไมโครเซกรีเกชันจะมีขนาดเล็กหรือเป็นเนื้อเดียวกันอย่างรวดเร็ว และเดนไดรต์หรือเซลล์เป็นผลมาจากเนื้อเชื่อมไม่ชัดเจน ประการสุดท้าย การเปลี่ยนเฟสหลังการแข็งตัว ถ้าเดนไดรต์หรือเซลล์เกิดขึ้นสามารถสร้างโครงสร้างจุลภาคใหม่ภายในเกรนและ/หรือไปยังขอบเกรนและเกรนย่อยเป็นผลมาจากเนื้อเชื่อมทำให้ลดต่ำลง [10]

การพิจารณาจะใช้กราฟการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง (Continuous-cooling transformation; CCT) เพื่อใช้ในการอธิบายการเกิดของโครงสร้างของเนื้อเชื่อมของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าผสมต่ำในรูปที่ 1.5 ใช้หลักการของ Onsoien et al. โดยใช้รูปที่หกเหลี่ยมแสดงภาพตัดขวางของเกรนอสเทนไนต์ตามยาว (Columnar austenite) ในเนื้อเชื่อม ขณะที่อสเทนไนต์ (γ) มีการเย็นตัวจากอุณหภูมิสูง เฟอร์ไรต์จะเริ่มก่อตัวที่บริเวณขอบเกรนและโตเข้าไปภายในเกรน เฟอร์ไรต์ที่ขอบเกรนเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “allotriomorphic ferrite” ซึ่งมีความหมายว่า เฟอร์ไรต์ที่ไม่มีรูปร่างที่แน่นอน ที่อุณหภูมิต่ำการเติบโตของเฟอร์ไรต์ที่ขอบเกรน (Grain boundary ferrite) จะลดลงเกิดเป็น Widmanstätten ferrite เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Side plate ferrite

เนื่องมาจากคาร์บอนจะแทนที่ด้วยลักษณะรูปที่เข้มในบริเวณที่เป็น Planar ซึ่งผลักให้เกิดการเติบโตของ Widmanstatten ferrite ซึ่งโตขึ้นในเวลาอันสั้นและจะเกิดนิวเคลียสใหม่ให้กับเฟอร์ไรท์จนกลายเป็น Acicular ferrite มีทิศทางอิสระ เป็นเฟอร์ไรท์สายสั้น มีลักษณะสานกันเหมือนตะกร้า [10] จากรูปที่ 1.6 แสดงกราฟการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง (CCT) ของเนื้อเชื่อมในการเกิดโครงสร้างจุลภาค ซึ่งจะแสดงบริเวณของโครงสร้างจุลภาคอย่างละเอียดกว่ารูป 1.15 [11]

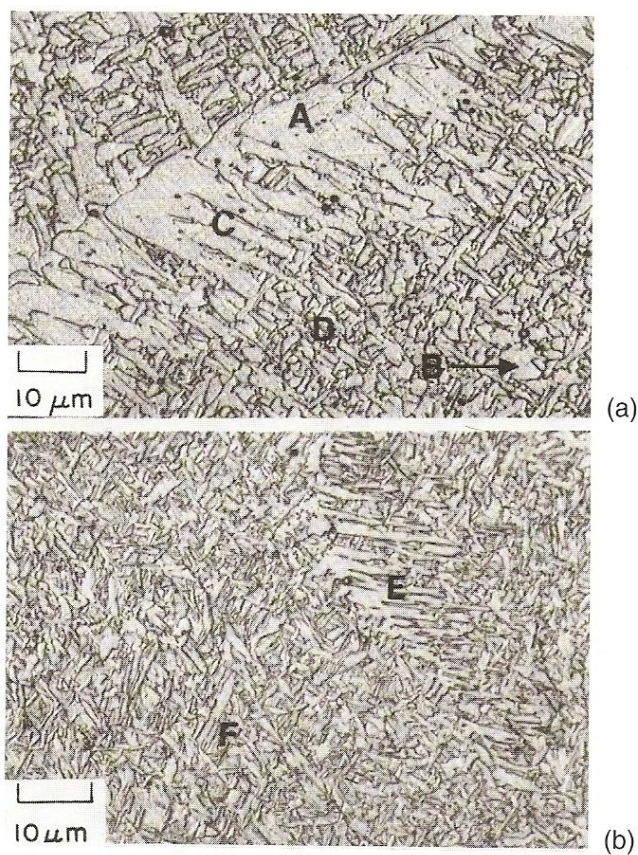


รูปที่ 1.5 แผนภาพการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องสำหรับเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน ที่มา: [10]

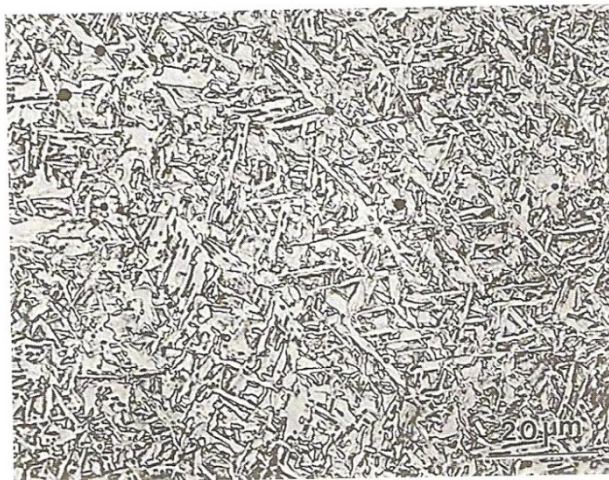


รูปที่ 1.6 กราฟการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องในการเชื่อมแสดงการเกิดโครงสร้างจุลภาค ที่มา: [10]

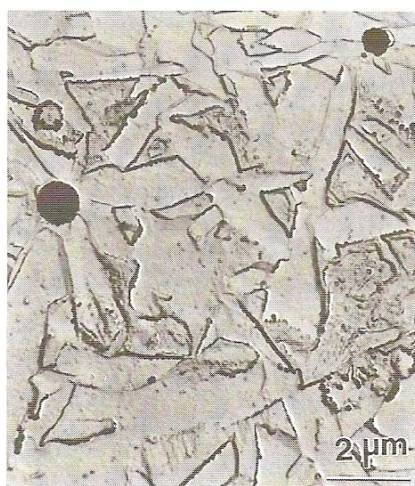
ในรูปที่ 1.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กผสมต่ำ รูปที่ 1.7a ประกอบด้วย (A) Grain boundary ferrite, (B) Polygonal ferrite, (C) Widmanstatten ferrite และ (D) Acicular ferrite และในรูปที่ 1.7b (E) upper bainite และ (F) lower bainite การทดสอบกับ Transmission electron microscopy (TEM) เพื่อจะระบุชนิด Upper และ Lower bainite โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนประกอบด้วย Acicular ferrite เป็นส่วนใหญ่แสดงในรูปที่ 1.8 และที่กำลังขยายสูงในรูปที่ 1.9 อนุภาคสีดำเป็น inclusion[8]



รูปที่ 1.7 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมในเหล็กกล้าผสมต่ำ A, grain boundary ferrite; B, polygonal ferrite; C, Widmanstatten ferrite; D, acicular ferrite E, upper bainite และ F, lower bainite ที่มา:[8]



รูปที่ 1.8 โครงสร้าง Acicular ferrite เป็นส่วนใหญ่ ที่มา: [8]



รูปที่ 1.9 โครงสร้าง Acicular ferrite และอนุภาคของ Inclusion ในเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำและเหล็กกล้าคาร์บอน ที่มา: [8]

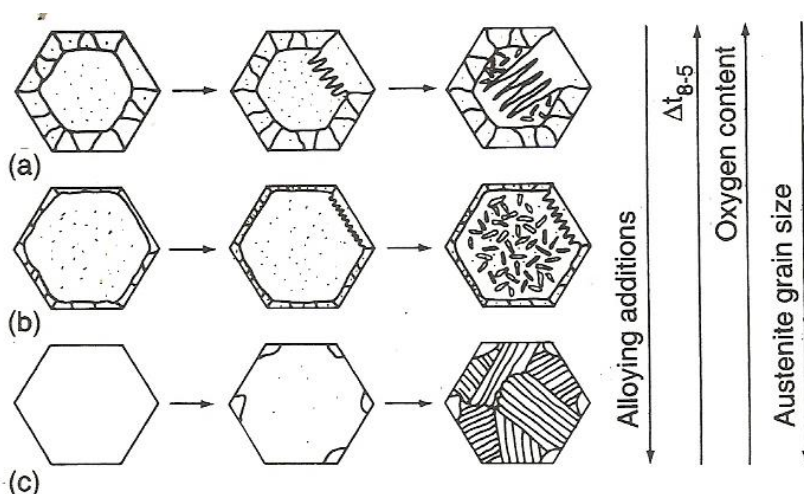
1.2.5.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาค (Factors Affecting Microstructure)[8]

Bhadeshia และ Suensson ได้อธิบายปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดโครงสร้างจุลภาคในเนื้อเชื่อม แสดงในรูปที่ 1.10 ได้แก่ ส่วนผสมทางเคมี (Weld metal composition) เวลาในการเย็นตัวจากอุณหภูมิ 800 ถึง 500 °C (Δt_{8-5}) ปริมาณออกซิเจนในเนื้อเชื่อม และขนาดเกรนออสเทนไนต์ ซึ่งสามารถใช้กราฟการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องช่วยอธิบาย

(1) เวลาในการเย็นตัว (Cooling Rate) พิจารณาด้านซ้ายเส้นโค้ง CCT (เส้นประ) ในรูปที่ 1.11 การเย็นตัวช้าลง (Δt_{8-5} เพิ่ม) จากเส้น 1 ไปยังเส้น 2 ไปยังเส้น 3 และโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนจากเบนไนท์ (Bainite) (รูปที่ 1.10c) ไปเป็น Acicular ferrite (รูปที่ 1.10b) ไปเป็น Grain boundary และ Widmanstatten ferrite (รูปที่ 1.10a)

(2) ธาตุผสม (Alloying additions) การเพิ่มธาตุผสม (higher hardenability) จะเลื่อนเส้นโค้ง CCT ทำให้เวลานานขึ้นและอุณหภูมิต่ำ พิจารณาด้านซ้ายเส้นโค้งการเย็นตัวเส้นที่ 3 ในรูปที่ 1.11 โครงสร้างจุลภาคจะเปลี่ยน จาก grain boundary และ widmanstatten ferrite (ด้านซ้ายเส้น CCT) เป็น acicular ferrite (กึ่งกลางเส้น CCT) เป็น Bainite (ด้านขวาเส้น CCT) ดังรูปที่ 1.10

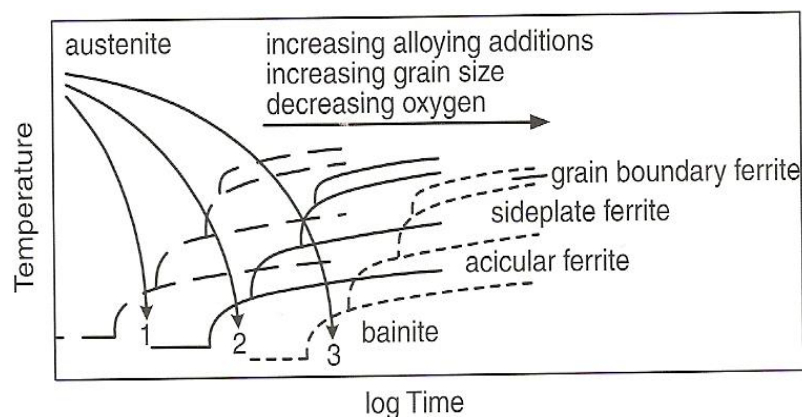
(3) ขนาดเกรน (Grain size) เหมือนกับการเติมธาตุผสม ขนาดเกรนเพิ่ม (พื้นที่ขอบเกรนน้อยสำหรับการเกิดเฟอไรท์) จะเลื่อนเส้นโค้ง CCT ไปด้านซ้ายที่เวลานานและอุณหภูมิต่ำกว่า



รูปที่ 1.10 แผนภาพผลกระทบการเพิ่มธาตุผสม เวลาในการเย็นตัวจาก 800-500 °C ปริมาณออกซิเจน และขนาดเกรนออสเทนไนท์ ที่มา: [8]

(4) ปริมาณออกซิเจนใน (Weld Metal Oxygen Content) ผลกระทบของปริมาณออกซิเจนในเนื้อเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมอธิบายได้ดังนี้ ประการแรก Fleck et al. ได้สังเกตการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged arc welds) ขนาดเกรนของออสเทนไนท์ (ในรูปที่ 1.12) ลดลง ส่งผลให้ปริมาณของออกซิเจนในเนื้อเชื่อมเพิ่มขึ้น ต่อมา Liu และ Olson สังเกตเห็นการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในเนื้อเชื่อมทำให้สัดส่วนโดยปริมาณของ inclusion เพิ่มขึ้น และลดขนาด inclusion ซึ่ง inclusion มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 0.1 μm. อนุภาคที่มีขนาดละเอียดยับยั้งการ

เกิดโตของเกรนโดย pinning ขอบเกรนจะมีขนาดเล็กลง และเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มปริมาณ ออกซิเจนในเนื้อเชื่อมจะลดขนาดเกรนออสเทนไนท์ที่เกิดขึ้นครั้งแรก (Prior austenite) ดังนั้น ผลกระทบของการลดของปริมาณออกซิเจนในเนื้อเชื่อมก็คล้ายกับการเพิ่มของขนาดเกรนออสเทนไนท์ แสดงในรูปที่ 1.11 ประการที่สอง inclusion ขนาดใหญ่เป็นตำแหน่งที่นิยมเกิด Acicular ferrite ขนาดของ inclusion จะอยู่ในช่วง 0.2-2.0 μm . และขนาดเฉลี่ยประมาณ 0.4 μm . ซึ่งเป็นค่าสูงสุด Fox et al. เสนอการเชื่อมได้ฟลักซ์ของเหล็กกล้า HY-100 ซึ่งจำนวน inclusion ไม่เพียงพอ สำหรับเกิด Acicular ferrite ถ้าปริมาณออกซิเจนต่ำ (<200ppm) ในทางกลับกัน inclusion ออกไซด์ ขนาดเล็กจำนวนมากเกิดขึ้นถ้าปริมาณออกซิเจนสูง (>300ppm) inclusion ขนาดเล็กมีประสิทธิภาพ เป็นนิวเคลียสของ Acicular ferrite ลดขนาดเกรน และจะให้พื้นที่ขอบเกรนสำหรับการเกิด grain boundary ferrite ปริมาณออกซิเจนสูงสุดที่เกิด Acicular ferrite ในรูปที่ 1.10b

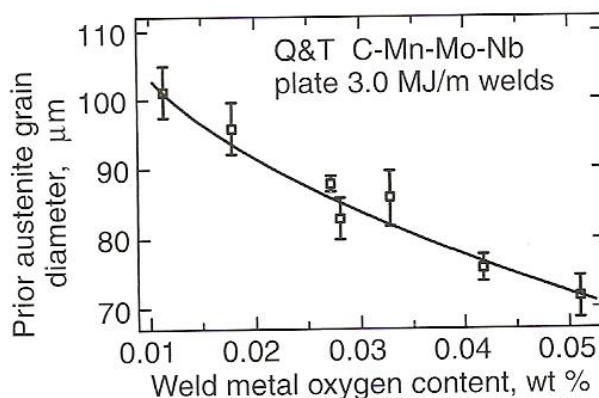


รูปที่ 1.11 ผลกระทบของธาตุผสม ขนาดเกรนออสเทนไนท์ และปริมาณออกซิเจนต่อกราฟ CCT สำหรับเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำและเหล็กกล้าคาร์บอน ที่มา: [8]

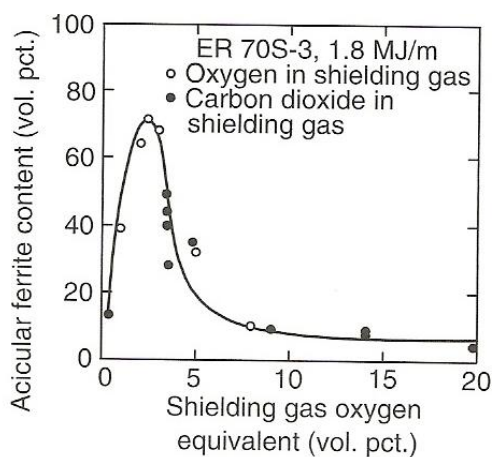
การมีปริมาณออกซิเจนสูงสุดสำหรับการเกิด Acicular ferrite ถูกรายงานโดย Onsoien et al. ในการเชื่อม GMAW กับแก๊สออกซิเจนหรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊ส อาร์กอน แสดงในรูปที่ 1.12 ถ้า Ar-O₂ เป็นแก๊สคลุม ค่าออกซิเจนเทียบเท่าเป็นเปอร์เซ็นต์โดย ปริมาตรของออสซิเจนในแก๊สคลุม แต่พถ้า Ar-CO₂ เป็นแก๊สคลุม กลายเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ของ CO₂ ในแก๊สคลุมซึ่งจะเหมือนกับปริมาณออกซิเจนในเนื้อเชื่อม ธาตุ hardenability มาก ได้แก่ Mn และ Si จากลวดเชื่อมถูกออกซิไดซ์ พิจารณาเส้นโค้งการเย็นตัว 3 ในรูปที่ 1.11 ขณะที่ค่า ออกซิเจนเทียบเท่าในแก๊สคลุมลด เส้น CCT เลื่อนจากซ้าย (เส้นประ) ไปกึ่งกลาง และโครงสร้าง

ส่วนใหญ่เป็น Acicular ferrite อย่างไรก็ตามค่าออกซิเจนเทียบเท่าในแก๊สคลุมจะลด เส้นโค้ง CCT จะเลื่อนจากกึ่งกลางไปยังด้านขวาและ acicular ferrite ไม่เยอะมาก

ปัจจัยที่ถูกรายงานถึงผลกระทบต่อจำนวนของ Acicular ferrite ในเนื้อเชื่อม ตัวอย่างที่ถูกรายงานโครงสร้าง Acicular ferrite เพิ่มกับการเพิ่ม basicity index ของฟลักซ์สำหรับการเชื่อมได้ฟลักซ์ โดยใช้ฟลักซ์ Ti, Mn และ Ni



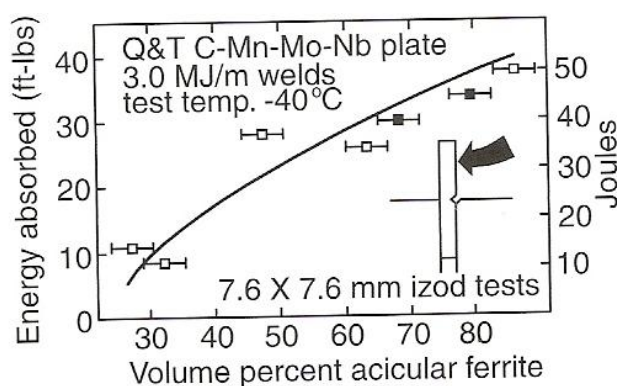
รูปที่ 1.12 เส้นผ่านศูนย์กลางเกรนออสเทนไนต์กับปริมาณออกซิเจนในการเชื่อมได้ฟลักซ์ ที่มา: [8]



รูปที่ 1.13 ปริมาณ Acicular ferrite กับปริมาณออกซิเจนในแก๊สคลุมสำหรับการเชื่อมอาร์คได้แก๊สคลุม ที่มา: [8]

1.2.5.3 ความเหนียวของเนื้อเชื่อม (Weld Metal Toughness)

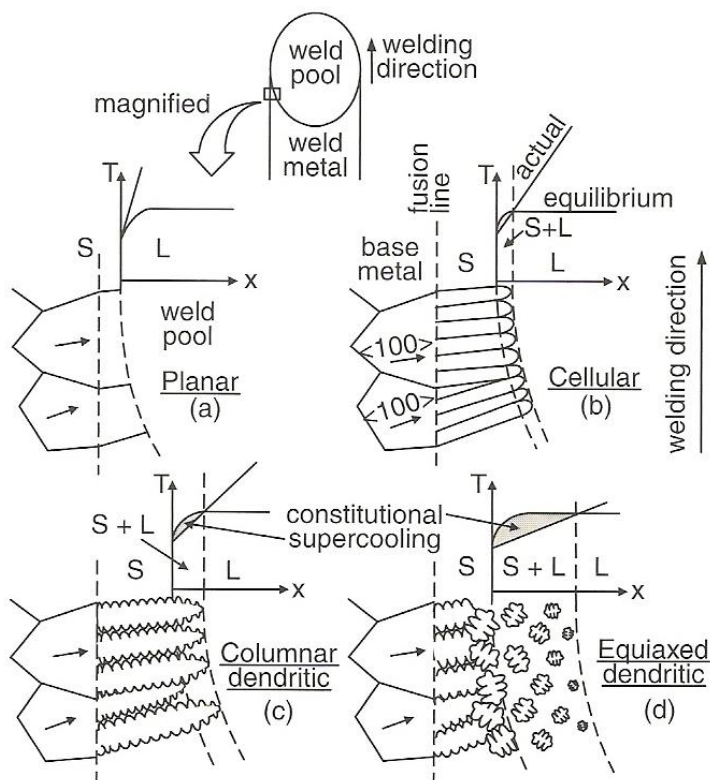
โครงสร้าง Acicular ferrite เป็นโครงสร้างที่ต้องการในเนื้อเชื่อม แสดงในรูปที่ 1.14 Dallam et al. สังเกตเห็นค่าความเหนียว Charpy V-notch ของเนื้อเชื่อมได้ฟลักซ์เพิ่มขึ้น เมื่อการเพิ่มสัดส่วนโดยปริมาณของ Acicular ferrite ในเนื้อเชื่อม การประสานกันโดยธรรมชาติของ Acicular ferrite รวมกับการขนาดเกรนละเอียด ส่งผลให้ต้านทานการพัฒนารอยแตกโดย cleavage ได้สูงสุด การเกิด Grain boundary ferrite, Ferrite side plates หรือ Upper bainite เป็นอันตรายต่อค่าความเหนียว เนื่องจากโครงสร้างเหล่านี้จะง่ายต่อการพัฒนารอยแตก



รูปที่ 1.14 ค่าความเหนียว Charpy V-notch กับสัดส่วนโดยปริมาณของโครงสร้าง Acicular ferrite ในการเชื่อมได้ฟลักซ์ ที่มา: [8]

1.2.6 โครงสร้างการเย็นภายในเกรนของเนื้อเชื่อม

เมื่ออัตรา Constitutional supercooling เพิ่มขึ้น ลักษณะการแข็งตัวภายในเนื้อเชื่อมจะเปลี่ยนแปลงจาก Planar ไปเป็น Cellular และจาก Cellular ไปเป็น Dendritic รูปที่ 1.15 แสดงแผนภาพผลกระทบของ Constitutional supercooling ต่อโครงสร้างจุลภาคภายในเกรนของเนื้อเชื่อม ซึ่งการแข็งตัวจะเปลี่ยนจาก Planar ไปเป็น Cellular Columnar dendritic และ Equiaxed dendritic ในขณะที่ระดับของ Constitutional supercooling ที่บริเวณบ่อหลอมละลายเพิ่มขึ้น การนิวเคลียสจากเนื้อที่แตกต่างกัน (Heterogenous nucleation) โดยได้รับการสนับสนุนจาก Constitutional supercooling ทำให้เกิดเกรน equiaxed ในเนื้อเชื่อม [12]



รูปที่ 1.15 ผลกระทบของ Constitutional supercooling ต่อลักษณะการเย็นตัวในระหว่างการเย็น (a) Planar; (b) Cellular; (c) Columnar dendritic; (d) Equiaxed dendritic ทั้งนี้ Constitutional supercooling เพิ่มขึ้นจาก (a) ไป (b) ทีมา: [12]

1.2.7 เฟสไดอะแกรมและ CCT ไดอะแกรม (Phase diagram and CCT Diagrams) [13]

บริเวณหลอมละลายในเหล็กกล้าคาร์บอนอาจนำไปเชื่อมโยงกับเฟสไดอะแกรม Fe-C แสดงในรูปที่ 1.16 เมื่อจลศาสตร์ (kinetic) ของการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วในระหว่างการเชื่อมต่อการเปลี่ยนเฟสบริเวณที่หลอมละลาย พิจารณาระยะที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน สอดคล้องกับพื้นที่ในชิ้นงานเชื่อมได้รับความร้อนต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature; A_1) คืออุณหภูมิยูเทคตอยด์ (Eutectoid temperature) และอุณหภูมิเพอริเทคติก (Peritectic temperature) ในทำนองเดียวกัน PMZ เป็นบริเวณที่ชิ้นงานเชื่อมได้รับอุณหภูมิเพอริเทคติกและอุณหภูมิลิควิดัส (Liquidus temperature) และบริเวณที่หลอมละลายกับพื้นที่เหนืออุณหภูมิลิควิดัส

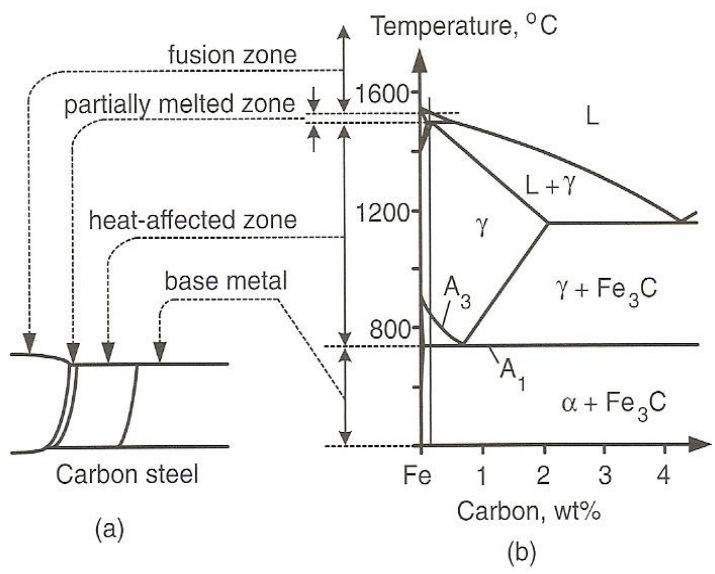
เฟสไดอะแกรม Fe-C และ CCT ไดอะแกรม สำหรับกระบวนการทางความร้อนของเหล็กกล้าคาร์บอนสามารถนำไปใช้ในการเชื่อมได้เป็นอย่างดี แต่พื้นฐานที่แตกต่างระหว่างการเชื่อมและกระบวนการทางความร้อนเป็นที่ยอมรับได้ ความร้อนในระหว่างการเชื่อมและ

กระบวนการทางความร้อนของเหล็กกล้าคาร์บอนที่แตกต่างที่กัน แสดงดังรูปที่ 1.17 โดยขั้นแรก อุณหภูมิเชื่อมสูงสุดบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนประมาณ 1500 °C ส่วนในกระบวนการทางความร้อนอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 900 °C ซึ่งไม่สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตบน (Upper critical temperature; A_3) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต้องการให้เกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ (γ) ขั้นที่สอง อัตราการให้ความร้อนสูงและรักษาเวลาเหนือเส้น A_3 สั้นกว่าในระหว่างการเชื่อม ยกเว้นการเชื่อมบางกระบวนการ เช่น Electroslog ในกรณีกระบวนการให้ความร้อน อัตราการให้ความร้อนจะช้ากว่า และเวลาการรักษาเหนือเส้น A_3 นานกว่า อุณหภูมิ A_1 และ A_3 ในระหว่างการให้ความร้อน (chauffage) จะเรียกว่าอุณหภูมิ Ac_1 และ Ac_3 ตามลำดับ

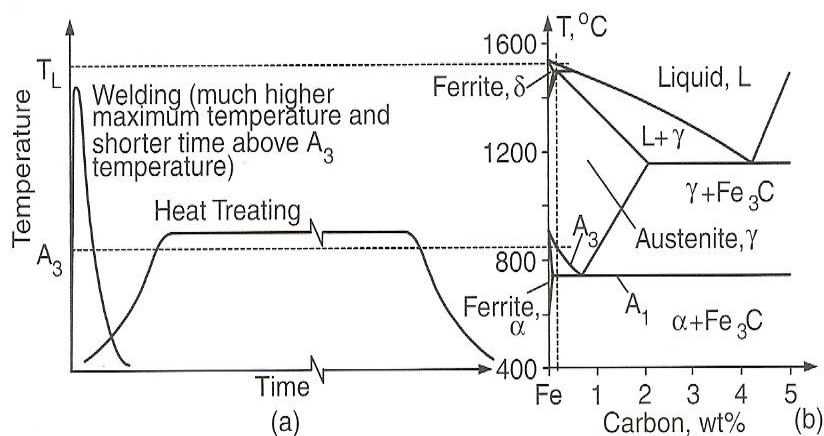
สำหรับเหตุผลทางด้านจลศาสตร์ อุณหภูมิ Ac_1 และ Ac_3 จะสูงกว่าอุณหภูมิ A_1 และ A_3 เล็กน้อย และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นหากเพิ่มอัตราการให้ความร้อนในระหว่างการเชื่อมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงที่ต้องการการแพร่กระจาย (ยกเว้นการเปลี่ยนแปลงเฟสจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์) และเวลาในการแพร่กระจาย นอกจากนี้ความร้อนในระหว่างการเชื่อม การเปลี่ยนแปลงเฟสอาจจะไม่เกิดที่อุณหภูมิ A_1 และ A_3 แต่จะเกิดขึ้นที่สูงกว่าอุณหภูมิ Ac_1 และ Ac_3 สำหรับเหล็กกล้าปริมาณของธาตุที่ฟอร์เมอร์ไบด์ ได้แก่ V, W, Cr, Ti และ Mo จะทำให้ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนมีความสำคัญมากขึ้น เพราะอัตราการแพร่ของธาตุเหล่านี้ต่ำกว่าของคาร์บอน และด้วยเหตุนี้ทำให้การเปลี่ยนแปลงเฟสช้ากว่าเมื่อมีธาตุที่ฟอร์เมอร์ไบด์

ผลรวมของอัตราการให้ความร้อนสูงและเวลาที่อุณหภูมิอยู่เหนือ Ac_3 น้อย ในการเชื่อมจะส่งผลให้เกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ในการให้ความร้อน เพราะว่าเวลาไม่เพียงพอที่ทำให้อะตอมของคาร์บอนในออสเทนไนต์เกิดการแพร่จากบริเวณเดิมที่เป็นเฟอร์ไรต์บางส่วน ของปริมาณคาร์บอนสูงไปเป็นเฟอร์ไรต์บางส่วน ของปริมาณคาร์บอนต่ำ เมื่อเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วเกิดเป็นมาร์เทนไซต์ที่บริเวณที่มีคาร์บอนสูง ในขณะที่บริเวณที่มีคาร์บอนน้อยกว่าจะกลายเป็นเฟอร์ไรต์ ความแข็งแรงระดับจุลภาคในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนสามารถกระจายค่าความแข็งในช่วงกว้าง

ผลของอุณหภูมิสูงในระหว่างการเชื่อมทำให้เกิดการเติบโตของเกรนใกล้บริเวณ บริเวณหลอมละลาย อัตราการเย็นตัวต่ำทำให้เวลาที่อุณหภูมิอยู่เหนือ Ac_3 นาน ทำให้การเติบโตของเกรนเป็นไปอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามในกรณีของกระบวนการทางความร้อนอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 900 °C ที่หลีกเลี่ยงการเติบโตของเกรน



รูปที่ 1.16 การเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน (a) บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (b) เฟสไดอะแกรม ที่มา: [13]



รูปที่ 1.17 การเปรียบเทียบกระบวนการเชื่อมและกระบวนการทางความร้อน (a) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (b) เฟสไดอะแกรมของ Fe-C ที่มา: [13]

CCT ไดอะแกรมสำหรับการเชื่อมสามารถสังเกตได้โดยใช้ความร้อนในการเชื่อม และ dilatometer ความเร็วสูงซึ่งจะตรวจหาการเปลี่ยนแปลงปริมาณโดยการเปลี่ยนเฟส อย่างไรก็ตาม CCT ไดอะแกรมสำหรับงานเชื่อมโดยตรงไม่ค่อยมี อาจจะใช้ CCT ไดอะแกรมของกระบวนการทางความร้อนมาใช้แทน โดยมีข้อแตกต่างกันบ้าง เช่น การเติบโตของเกรนในการเชื่อมสามารถ

เลื่อน CCT ไคอะแกรมไปทางขวา ทำให้เวลาในการเกิดมาร์เทนไซต์นานขึ้น เพราะว่าการเติบโตของเกรนลดพื้นที่ตามขอบเกรนสำหรับการเกิดเฟอร์ไรต์และเพอร์ไรต์ในระหว่างการเย็นตัว อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วในการเชื่อมสามารถเลื่อน CCT ไคอะแกรมทำให้เวลาในการเกิดมาร์เทนไซต์น้อย ธาตุที่ฟอร์มคาร์ไบด์ ได้แก่ Cr, Mo, Ti, V และ Nb เมื่อละลายอยู่ในโครงสร้างออสเทนไนท์ มีแนวโน้มในการเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กกล้า เนื่องจากมีเวลาเพียงพอในกระบวนการทางความร้อน เช่น คาร์ไบด์จะละลายได้อย่างสมบูรณ์ และปรับปรุงความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กกล้า

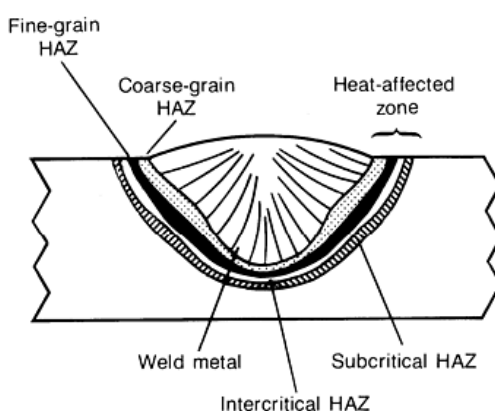
1.2.8 ลักษณะรูปร่างของเนื้อเชื่อม (Characteristic Features of Welds) [14]

1.2.8.1 เนื้อเชื่อมชั้นเดียว (Single-Pass Weldments) การเข้าใจความสามารถในการเชื่อม (weldability) เป็นสิ่งจำเป็นที่ทำให้ทราบบริเวณการเชื่อมที่แตกต่างกัน ในกรณีของแนวเชื่อมชั้นเดียว เนื้อเชื่อมจะแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือ บริเวณหลอมละลายหรือบริเวณเนื้อเชื่อม และบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน แสดงในรูปที่ 1.18 ภายในบริเวณหลอมละลายอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมละลายของโลหะเดิม และส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมขึ้นอยู่กับส่วนผสมของลวดเชื่อมที่ใช้และโลหะเดิม และสภาวะการเชื่อม

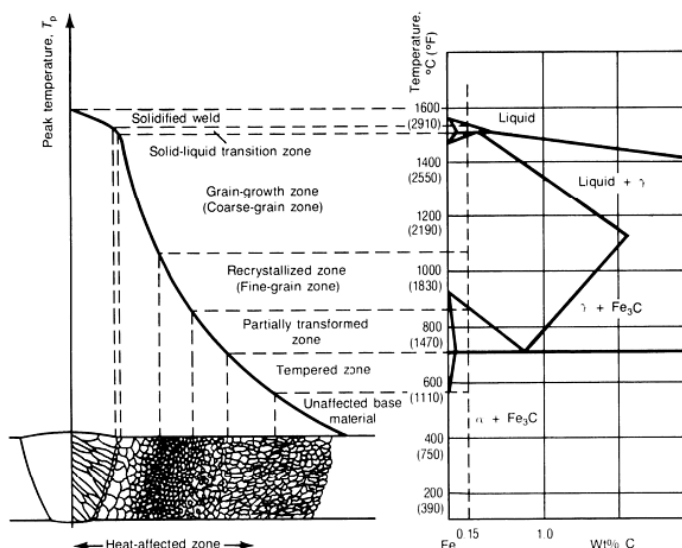
ภายใต้สภาวะของการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว และการแข็งตัว (solidification) ในเนื้อเชื่อม ธาตุผสมและธาตุเจือปน (impurity element) แบ่งออกอย่างกว้างขวางไปถึงศูนย์กลางของบริเวณอินเตอร์เดนไดรต์ (interdendritic) หรืออินเตอร์เซลล์ลูลา (intercellular) ไปยังศูนย์กลางของแนวเชื่อม ส่งผลสำคัญที่ตำแหน่ง inhomogeneities ทางเคมี ดังนั้นพฤติกรรมกลการเปลี่ยนเฟสของเนื้อเชื่อมจะแตกต่างจากพฤติกรรมกลการเปลี่ยนเฟสของโลหะเดิม แม้ว่าองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่จะไม่เปลี่ยนแปลงโดยการเชื่อม ลักษณะทั่วไปของการแข็งตัวและโครงสร้างของเนื้อเชื่อม จะแสดงใน รูปที่ 1.18

ส่วน ผสม ทางเคมีที่ยังเหลืออยู่อย่างมากมาย ซึ่งไม่เปลี่ยนใน บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน เพราะอุณหภูมิสูงสุดต่ำกว่าจุดหลอมละลายของ Parent plate แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างจุลภาคสามารถเกิดขึ้นภายในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ในระหว่างการเชื่อม ขณะที่ผลของวัฏจักร ทางความร้อนรุนแรงอย่างมาก วัสดุจะหลอมติดกันทันทีจนถึง บริเวณหลอมละลายความร้อนสูงกลายเป็นช่วงอุณหภูมิ austenite microalloy ตกตะกอนซึ่งการพัฒนาในระยะแรกจะเจือจาง และ unpinning ของขอบเกรนออสเทนไนท์เกิดการเติบโตของเกรน ฟอร์มเกรนหยาบบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (coarse-grain HAZ) ขนาดเฉลี่ยของเกรนออสเทนไนท์ ซึ่งหน้าที่ของอุณหภูมิสูงสุดลดกััระยะทางจากบริเวณหลอมละลาย อัตราการเย็นตัว

เปลี่ยนแปลงจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่งในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ได้แก่ อัตราการเย็นตัวเพิ่มกับอุณหภูมิสูงสุดเพิ่มที่ความร้อนในการเชื่อมคองที่และลดกับการเพิ่มความร้อนในการเชื่อมที่อุณหภูมิสูงสุดคองที่ เนื่องจากสภาวะทางความร้อนเปลี่ยนแปลงจากระยะทางจากเส้นหลอมละลาย บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนประกอบด้วย บริเวณเกรนหยาบ (coarse-grain zone; CGHAZ) บริเวณเกรนละเอียด (fine-grain zone; FGHAZ) บริเวณ intercritical (intercritical zone; ICHAZ) และบริเวณ subcritical (subcritical zone; SCHAZ) บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนต่าง ๆ ของเนื้อเชื่อมชั้นเดียวเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นการเชื่อมต่อ แสดงในรูปที่ 1.19

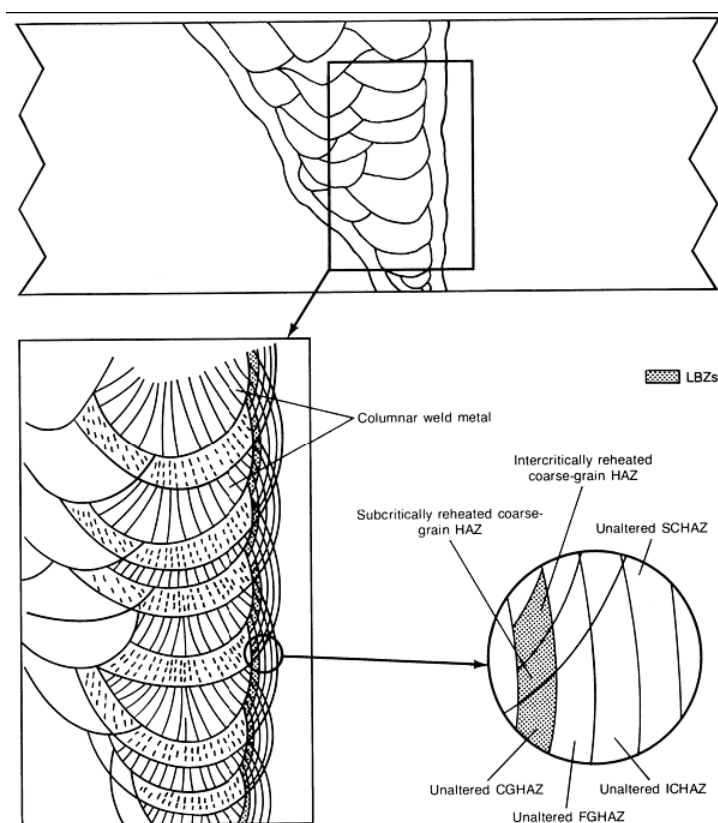


รูปที่ 1.18 บริเวณต่าง ๆ ของแนวเชื่อมชั้นเดียว ที่มา: [14]



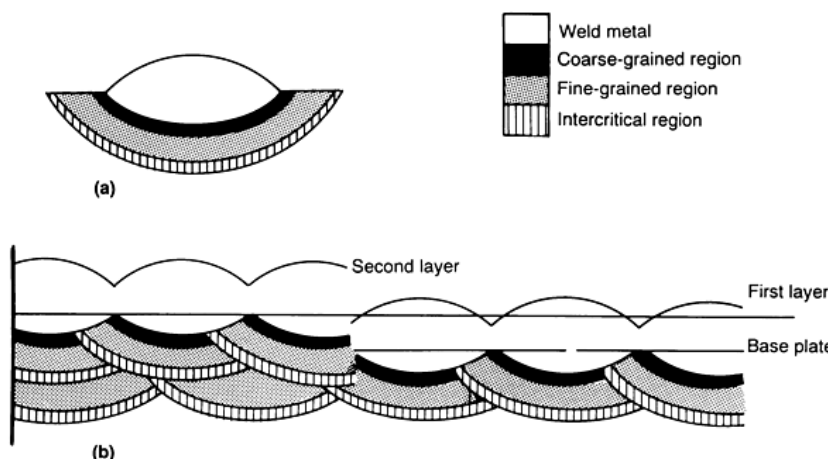
รูปที่ 1.19 บริเวณต่าง ๆ ที่เกิดในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนของเหล็กกล้าคาร์บอนประมาณ 0.15%C ที่มา: [14]

1.2.8.2 เนื้อเชื่อม หลายชั้น (multipass weldments) ในเนื้อเชื่อมหลายชั้น จะมีความซับซ้อนกว่าเนื้อเชื่อมชั้นเดียว เพราะการแสดงบริเวณ reheat ภายในบริเวณหลอมละลาย (รูปที่ 1.20) ความละเอียดของโครงสร้างจุลภาค บางส่วน โดยชั้นของการเชื่อม ที่ตามมาภายหลัง จะเพิ่ม inhomogeneity ของบริเวณ ต่าง ๆ เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกล Reaustenitiation และความร้อน subcritical มีผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคที่ตามมาภายหลังและสมบัติของ บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ค่าความเหนียว (Toughness) ที่ลดลง เป็นผลมาจากบริเวณพื้นที่ขนาดเล็ก ๆ ของบริเวณเกรนหยาบ (CGHAZ) ซึ่งเป็นบริเวณเปราะ (localized brittle zones; LBZ) บริเวณ LBZ ประกอบด้วย unaltered CGHAZ, intercritically reheated coarse-grain (IRCG) heat-affected zone และ subcritically reheated coarse-grain (SRCG) heat-affected zone ที่เส้นหลอมละลายที่ติดกันบริเวณ LAZ อาจจะถูกจัดให้เป็นบริเวณเปราะและเป็นบริเวณที่ง่ายต่อการพัฒนารอยแตก การแตกเกิดขึ้นไปยังเส้นหลอมละลาย [11]



รูปที่ 1.20 การทับกันบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากบริเวณเปราะ (localized brittle zones; LBZ) ไปยังเส้นหลอมละลาย ที่มา: [14]

กระบวนการเชื่อมเทมเปอร์แนวเชื่อม สองชั้นแสดงในรูปที่ 1.21 ความร้อนในการเชื่อมของแนวเชื่อมชั้นแรกและชั้นที่สองถูกควบคุมอย่างระมัดระวัง เพื่อให้ความร้อนจากการเชื่อมชั้นที่สองแก้ไขบริเวณเกรนหยาบให้ละเอียดขึ้นในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ของเนื้อเดิมในระหว่างการเชื่อมชั้นแรก [15]



รูปที่ 1.21 กระบวนการเชื่อมซ่อมสองชั้น (a) บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนของแนวเชื่อมชั้นเดียว (b) ชั้นแรกเป็นบริเวณเกรนหยาบ ที่เกิดในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนของโลหะเดิม (ส่วนด้านขวาของรูปที่) การทับของแนวที่สองทำให้ บริเวณเกรนหยาบละเอียดขึ้นและเริ่มเกิดบริเวณเกรนหยาบ (ส่วนด้านซ้ายของรูปที่) ที่มา: [15]

1.2.9 ความล้า (Fatigue) [16]

เมื่อวัสดุรับแรงกระทำซ้ำ ๆ ซึ่งต่ำกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength) อาจเกิดการแตกหักขึ้นได้ เนื่องจากความล้า (fatigue) ความล้าเป็นสาเหตุ ส่วนใหญ่ในการเกิดความเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรต่าง ๆ เพราะตลอดอายุ การใช้งานของเครื่องจักรจะเกิดความเค้นสลับไปสลับมาเป็นล้าน ๆ ครั้ง ซึ่งความเสียหาย เนื่องจากความล้าเริ่มต้นจากรอยร้าวขนาดเล็ก ซึ่งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า เมื่อรอยร้าวเกิดขึ้นจะมีผลทำให้ความเค้นเพิ่มมากขึ้นและรอยร้าวจะขยายมากขึ้นอย่างรวดเร็ว พื้นที่หน้าตัดที่อยู่ภายใต้ความเค้นลดลงความเค้นเพิ่มสูงขึ้น จนในที่สุดพื้นที่หน้าตัดที่เหลือก็จะขาดออกจากกันอย่างฉับพลัน

ในปี 1829 มีเอกสารชิ้นแรกที่ระบุถึงการชำรุดจาก Repeat Load โดย Albert ชาวเยอรมันและจากนั้นเป็นต้นมา มีการวิจัยกันเกือบทุกมุมโลก ซึ่งการวิจัยทางความล้าแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหม่ ๆ คือ

(1) กลุ่มนักโลหวิทยาและนักวัสดุ ซึ่งกลุ่มนี้สนใจระดับจุลภาค พยายามค้นหาสาเหตุของจุดเริ่มต้นการเติบโตรอยแตก โดยลงถึงระดับโครงสร้างจุลภาค เช่น Dislocation ลักษณะของเกรน ความไม่สมบูรณ์ของเกรน Inclusion ชนิดของโครงสร้างจุลภาคต่าง ๆ

(2) กลุ่มนักออกแบบ กลุ่มนี้ให้ความสนใจระดับจุลภาคน้อย แต่ให้ความสนใจและมองภาพระดับมหภาค โดยนำเอาผลจากการทดสอบของกลุ่มแรกและของตัวเองมาใช้ในการออกแบบ และพยายามแปรค่าต่าง ๆ ให้สามารถนำมาใช้กำหนดอย่างเป็นรูปที่ธรรม ซึ่งใช้ผลการทดลองในเชิงสถิติเป็นหลัก เช่น ลักษณะต่าง ๆ ของภาวะ คุณสมบัติทางกลของวัสดุ รูปที่ร่างเรขาคณิตของชิ้นงาน กรรมวิธีการผลิต

1.2.9.1 สาเหตุการชำรุดจากความล้า สามารถสรุปสาเหตุได้จาก 3 ปัจจัย ดังนี้

(1) ภาระแบบวัฏจักร (Cyclic Load) เป็นภาระที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนต่าง ๆ โดยมีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) ของภาระกับเวลา ดังรูปที่ 1.22 ซึ่งเป็นธรรมชาติของชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ อาทิเช่น เพลahmen ก้านสูบ แกนลำ เสื้อสูบ สะพาน เป็นต้น อาจจะควบคุมได้ยากหรือไม่สามารถควบคุมได้ หรือเกิดจากเหตุที่ไม่พึงประสงค์ เช่น การเสียดสี ชิ้นงานที่เกิดการชำรุดจากความล้าชนิดของแรงจะเป็นแรงชนิดนี้ทุกกรณี ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นที่เปลี่ยนแปลงได้ ดังนี้

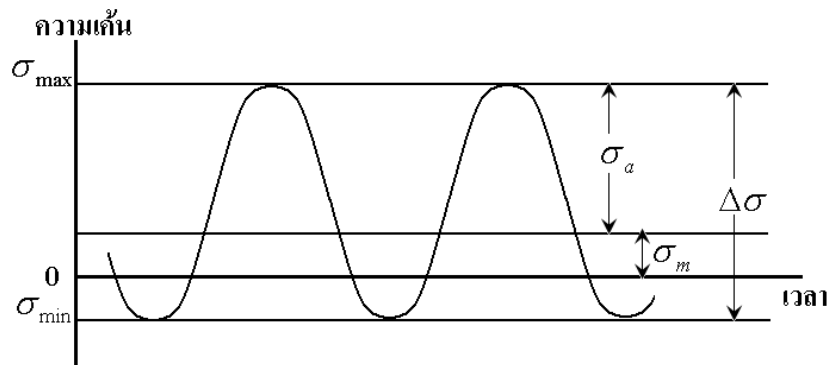
$$\sigma_{mean} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (1.6)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (1.7)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1.8)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (1.9)$$

โดย	σ_{max}	คือ ความเค้นที่ภาระสูงสุด
	σ_{min}	คือ ความเค้นที่ภาระต่ำสุด
	σ_{mean}	คือ ความเค้นเฉลี่ย
	σ_a	คือ แอมพลิจูดของความเค้น
	$\Delta\sigma$	คือ พิสัยของความเค้น
	R	คือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่ำสุดและสูงสุด



รูปที่ 1.22 ลักษณะของภาระวัฏจักร ที่มา:[16]

(2) **บริเวณความเข้มข้นความเค้น (Stress Concentration Area)** เป็นบริเวณที่เกิดความเค้นสูงกว่าปกติ ซึ่งเกิดจากชิ้นส่วนมีรูปร่างที่ร่างเป็นตัวเพิ่มความเค้น (Stress Raiser) เช่น รอยบาก (Notch) มุมตกป๋่า (Fillet) รู (Hole) ร่อง (Groove) รอยแตก (Crack) ซึ่งเกิดจากการออกแบบหรือผลจากการใช้ชิ้นงาน ทำให้บริเวณดังกล่าวอาจมีความเค้นสูงเกินความแข็งแรงคราก และบริเวณความเข้มข้นความเค้นจะเป็นจุดเริ่มของรอยแตกเสมอ บริเวณความเข้มข้นความเค้นมี 3 ประเภท คือ

- Mechanical Notch เกิดจากการกระทำทางกล เช่น เกิดจากการออกแบบเพื่อให้ชิ้นส่วนตรงตามความต้องการในการทำงาน เช่น การบำรุงรักษา เช่น มุมตกป๋่า (Fillet) ร่องลิ้ม (Key Way) ร่อง (Groove) ร่องเกลียว (Thread) และเกิดจากการกระทำที่รู้เท่าไม่ถึงการณ์ จากการทำงาน การประกอบ การบำรุงรักษา เช่น รอยขีดข่วน รอยเจียร โคนคมตัด รอยนูนการกระแทก การสึกหรอ การเชื่อม รอยจาก Fretting wear

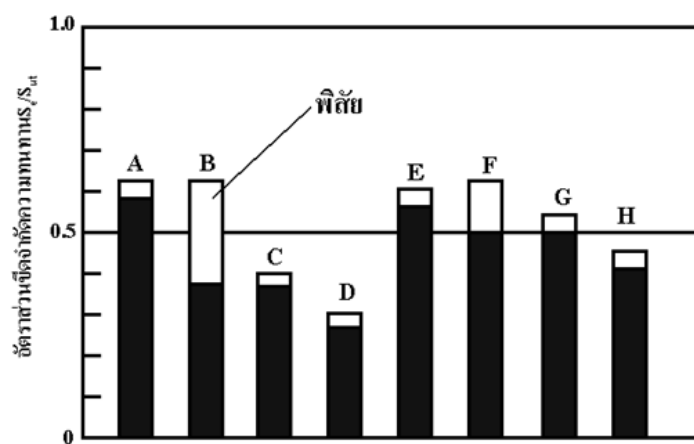
- ความบกพร่อง (Defect) ภายในเนื้อวัสดุที่เกิดจากการผลิตหรือการใช้งาน เช่น Impurities, Inclusion, Porosity, Void, Segregation, Corrosion, Lamination, Solidification Crack, Microcrack Hydrogen Induce Cracking ฯลฯ

- Metallurgical Notch เกิดจากความไม่สมบูรณ์ภายในเกรน เช่น Dislocation, Grain Boundary, Second Phase Particle เป็นต้น

(3) **คุณสมบัติของวัสดุ (Materials Properties)** ซึ่งแต่ละชนิดจะมีสมบัติไม่เหมือนกันในกรณีของโลหะ เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสม เหล็กหล่อ ทองแดงผสม อลูมิเนียมผสม สมบัติต่าง ๆ เป็นผล ของส่วนผสมทางเคมี (Chemical Composition) ชนิดของโครงสร้างจุลภาคและกระบวนการการผลิต เช่น กระบวนการขึ้นรูปที่ (Forming) กระบวนการอบ

ชูบทางความร้อน ทำให้สมบัติเปลี่ยนแปลงไป เช่น ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงคราก ความแข็งแรงกระแทก ความแข็ง การต่อต้านการล้า ฯลฯ

ชนิดของโครงสร้างจุลภาคกับจุดเริ่มต้นของรอยแตก จากการวิเคราะห์การชำรุดของชิ้นงานที่ชำรุดพบว่า การต่อต้านการเกิดจุดเริ่มความล้าแตกต่างกัน บางกรณีพบโครงสร้างที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในชิ้นงาน เช่น เฟอร์ไรต์ เฟอร์ไลต์ อันเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ อัมเปอร์/โลเวอร์ เบนไนท์ รีเทนออสเทนไนท์



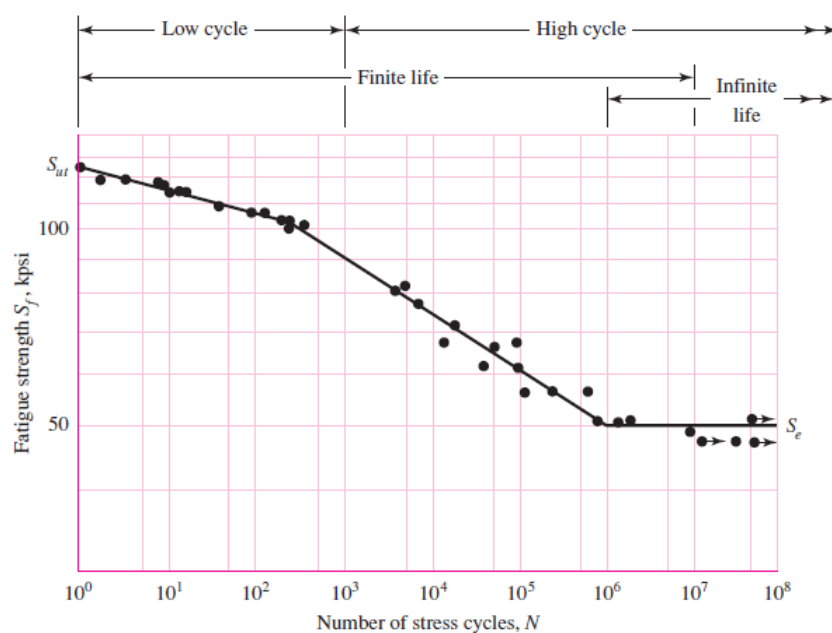
- | | |
|------------------------|--|
| A= เฟอร์ไรต์ | B= เฟอร์ไรต์+เฟอร์ไลต์ |
| C= เฟอร์ไลต์ | D= อันเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ |
| E= เทมเปอร์มาร์เทนไซต์ | F= เทมเปอร์มาร์เทนไซต์+เทมเปอร์เบนไนท์ |
| G= เทมเปอร์เบนไนท์ | H= ออสเทนไนท์ |

รูปที่ 1.23 ผลของโครงสร้างจุลภาคต่อขีดจำกัดความทนทาน ที่มา: [16]

1.2.9.2 การทดสอบความล้า (Fatigue Testing) ชิ้นทดสอบจะได้รับแรงซ้ำ ๆ ที่รู้ขนาดและวัฏจักรความเค้นที่ถูกระบุได้ การทดสอบความล้าที่รู้จักเป็นอย่างดีจะถูกทดสอบกับ R.R. Moore testing machine (Rotating beam fatigue testing) ซึ่งชิ้นทดสอบจะหมุนไปพร้อม ๆ กับระบบน้ำหนัก ทำให้ชิ้นทดสอบรับ pure bending moment เพียงอย่างเดียว เมื่อชิ้นทดสอบหมุนตำแหน่งสูงสุด จะอยู่บริเวณผิวกึ่งกลางคาน ซึ่งความเค้นที่จุดดังกล่าวจะเป็น Tensile Stress และ Compressive Stress กลับไปกลับมาเป็นวัฏจักร (Cycle)

จากการทดสอบเมื่อเพิ่มน้ำหนักสูง ทำให้ความเค้นที่ขึ้นทดสอบสูงขึ้นด้วย พบว่าขึ้นทดสอบจะขาดที่จำนวนรอบต่ำ ๆ และเมื่อลดน้ำหนักลง ขึ้นทดสอบที่ขาดจะมีจำนวนรอบมากขึ้น ๆ จนถึงค่าหนึ่งขึ้นงานจะไม่ขาด และเมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบที่ขึ้นงานชำระมาเขียนกราฟเรียกว่า S-N Curve

1.2.9.3 กราฟ S-N (S-N Curve) การทดสอบความแข็งแรงล้าของ Wohler ในประเทศเยอรมัน ซึ่งได้ทดสอบขึ้นงานกับคานหมุนภายใต้แรงสลับ (Alternating force) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบที่ชำระ และนำความเค้นของขึ้นทดสอบที่ชำระกับจำนวนรอบที่ได้ เขียนในกราฟมาตราส่วนเชิงเส้นลอการิทึมระหว่างความเค้นกับรอบที่ชำระ ในกราฟมาตราส่วนเชิงเส้นลอการิทึมระหว่างความเค้นและจำนวนรอบที่ชำระ ดังรูปที่ 1.24



รูปที่ 1.24 S-N Curve ที่มา: [17]

จากกราฟ S-N Curve แบ่งช่วงอายุของกราฟไว้ 2 ช่วง คือ ช่วงอายุรอบต่ำ (Low Cycle) และช่วงอายุรอบสูง (High Cycle) ซึ่งช่วงอายุรอบต่ำจะมีจำนวนรอบระหว่าง 1-1,000 รอบ ส่วนช่วงอายุรอบสูงเป็นช่วงที่อายุรอบสูงกว่า 1,000 รอบ และเมื่อความเค้นสูงสุดที่ขึ้นงานไม่ชำระที่จำนวนรอบสูงกว่า 1,000,000 รอบ เรียกความเค้นดังกล่าวว่า ขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ

(Endurance Limit, S'_e) และยังแบ่งช่วงอายุเป็น finite life ซึ่งครอบคลุมจำนวนรอบที่ชำรุด 1-1,000,000 (หรือ 10^7) รอบ และ infinite คือ จำนวนรอบที่มากกว่า 10^6 (10^7) รอบ

1.2.9.4 ขีดจำกัดความทนทาน (Endurance Limit) สำหรับการทดสอบโลหะหลาย ๆ ชนิด เพื่อหา S-N Curve พบว่า S-N Curve ที่ได้จะแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

(1) โลหะที่ขึ้นทดสอบไม่เกิดการชำรุดที่อายุมากกว่า 1×10^6 รอบ จะแสดงขีดจำกัดความทนทาน ซึ่งในกราฟ S-N Curve จะมี Knee เกิดขึ้น เช่น เหล็กกล้า เหล็กหล่อ สแตนเลสบางกลุ่ม โมลิบดีนัม ไททานเนียม และโพลีเมอร์บางกลุ่ม

(2) โลหะที่ทดสอบยังชำรุดแม้ว่ารอบมากกว่า 1×10^6 รอบ ไม่แสดงขีดจำกัดความทนทาน เช่น อลูมิเนียม ทองแดง แมกนีเซียม นิกเกิลอัลลอยด์ สแตนเลสบางกลุ่ม เหล็กกล้า ความแข็งแรงสูงบางเกรด

จากการนำผลการทดสอบความแข็งแรงของเหล็กกล้าที่มี Knee มาหาความสัมพันธ์ระหว่างขีดจำกัดความทนทานที่ 1×10^6 รอบ จะได้กราฟในรูปที่ 1.25 ซึ่งพบว่าช่วงแรกความแข็งแรง 0-200 kpsi (0-1400 MPa) ความสัมพันธ์จะเป็นนัยยะ จึงให้ความสัมพันธ์ระหว่างขีดจำกัดความทนทานกับความแข็งแรงดังเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น แต่เมื่อความแข็งแรงเกิน 200 kpsi การกระจายตัวของผลการทดสอบจะเริ่มไม่เป็นนัยยะ เพื่อความปลอดภัยจึงกำหนดให้ขีดจำกัดความทนทานเป็นเส้นตรงคงที่ที่ 107 kpsi (1460 MPa) ซึ่งสรุปได้เป็นสมการ 1.10 และ 1.11

$$S'_e = 0.506 S_{ut} \text{ MPa} \quad \text{เมื่อความแข็งแรงดึง} < 1460 \text{ MPa} \quad (1.10)$$

$$S'_e = 740 \text{ MPa} \quad \text{เมื่อความแข็งแรงดึง} > 1460 \text{ MPa} \quad (1.11)$$

ความสัมพันธ์ของขีดจำกัดความทนทานของเหล็กหล่อตามสมการ 1.12 และ 1.13

$$S'_e = 0.4 S_{ut} \text{ MPa} \quad \text{เมื่อความแข็งแรงดึง} < 400 \text{ MPa} \quad (1.12)$$

$$S'_e = 160 \text{ MPa} \quad \text{เมื่อความแข็งแรงดึง} > 400 \text{ MPa} \quad (1.13)$$

ส่วนโลหะที่ไม่มี Knee ให้ใช้ความแข็งแรงล้าที่รอบ 5×10^8 รอบ มาแทนค่าขีดจำกัดความทนทาน

อลูมิเนียม

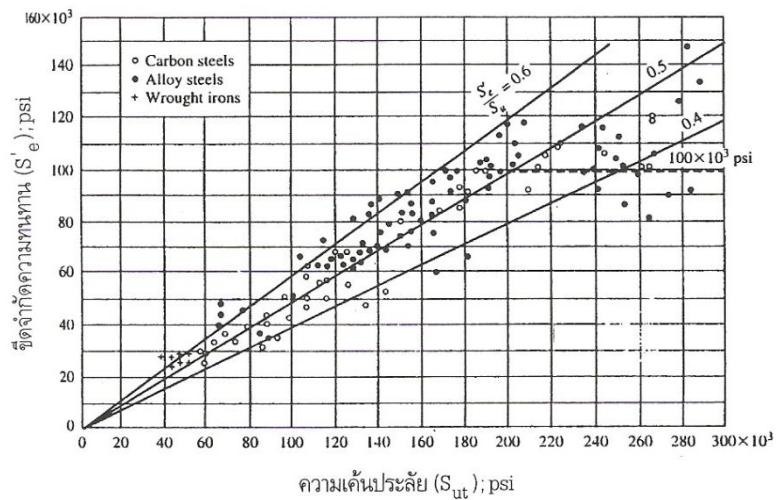
$$S'_f = 0.4 S_{ut} \text{ MPa} \quad \text{เมื่อความแข็งแรงดึง} < 330 \text{ MPa} \quad (1.14)$$

$$S'_f = 130 \text{ MPa} \quad \text{เมื่อความแข็งแรงดึง} > 330 \text{ MPa} \quad (1.15)$$

ทองแดงผสม

$$S'_f = 0.4 S_{ut} \text{ MPa} \quad \text{เมื่อความแข็งแรงดึง} < 280 \text{ MPa} \quad (1.16)$$

$$S'_f = 100 \text{ MPa} \quad \text{เมื่อความแข็งแรงดึง} > 280 \text{ MPa} \quad (1.17)$$



รูปที่ 1.25 ความสัมพันธ์ระหว่างขีดจำกัดความทนทาน (S'_e) กับค่าความแข็งแรงดึง (S_{ut}) ที่มา: [18]

1.2.9.5 ความแข็งแรงล้า (Fatigue strength)

กราฟ S-N Curve จะแสดงรูปที่แบบความแตกต่างของพฤติกรรม เนื่องจากจำนวนรอบความเสียหายที่เพิ่มขึ้นภายในขอบเขตของการล้า คือ ความล้าตัววัสดุภายใต้จำนวนรอบที่ต่ำ และความล้าตัวของวัสดุภายใต้จำนวนรอบที่สูง ความชันของเส้นจะมากขึ้นเพียงใดขึ้นอยู่กับความล้าที่จำนวนรอบต่ำต่อความล้าตัวที่จำนวนรอบสูง

(1) ความล้าของวัสดุอายุรอบต่ำ (low-cycle fatigue) สืบเนื่องจากถูกแรงกระทำนั้น ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะเป็นการเสียหายที่ต่ำกว่า 1,000 รอบตามปกติ และสำหรับชิ้นส่วนประกอบที่อยู่ในช่วงของรอบต่ำ ๆ นี้ ผู้ออกแบบไม่จำเป็นต้องสนใจผลกระทบจากการล้าของวัสดุ หรือไม่ก็อาจจะลดระดับของความเค้นใช้งานลง เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการล้าตัวน้อยลงซึ่งการกระทำเช่นนี้ หรือการไม่สนใจการล้าตัวในช่วงนี้ คือ ที่รอบ 10^3 อาจจะดูเหมือนว่าเป็นการยากที่จะเริ่มต้นแก้ปัญหา อย่างไรก็ตามช่วงที่อยู่ในรอบต่ำนั้นจะทำให้ค่าความชันน้อยมากในช่วงนี้ ในการออกแบบทางสถิติศาสตร์ มักจะใช้ความต้านทานการครากตัว และไม่ใช้ค่าความต้านทานดึงสูงสุด ดังนั้นความต้านทานการล้าตัวสำหรับเหล็กที่เริ่มล้าตัว ในรอบที่สูงขึ้นสามารถประมาณค่าได้ดังนี้

$$S'_L = 0.9 S_{ut} \quad \text{ชิ้นงานรับโมเมนต์ดัด} \quad (1.18)$$

$$S'_L = 0.75 S_{ut} \quad \text{ชิ้นงานรับแรงในแนวแกน} \quad (1.19)$$

$$S'_L = 0.72 S_{ut} \quad \text{ชิ้นงานรับแรงบิด} \quad (1.20)$$

(2) ความล้าของวัสดุอายุรอบสูง (high-cycle fatigue) หมายถึง ความเสียหายจากการล้าตัวของวัสดุ ซึ่งจะเกิดขึ้นที่จำนวนรอบ 10^3 รอบขึ้นไปแต่ต่ำกว่า 10^6 รอบ ซึ่งความทนทานการล้าตัวที่ตำแหน่งใด ๆ ระหว่าง S'_L และ S'_U สามารถประมาณค่าได้โดยใช้สมการ 1.21

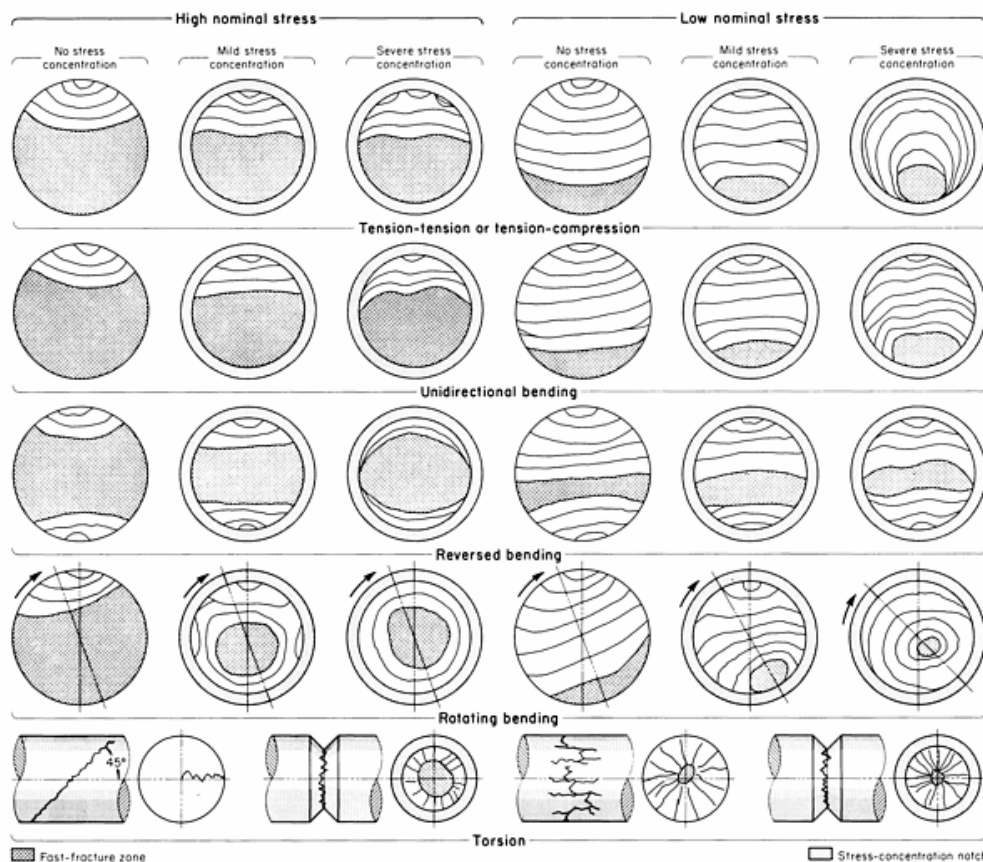
$$S'_f = AN^B \quad (1.21)$$

$$\log S'_f = B \log N + \log A \quad (1.22)$$

เมื่อ $A =$ จุดตัดบนแกนในแนวนิ่ง

$B =$ ความชันของสมการ

1.2.9.6 ลักษณะผิวการแตกหักจากความล้า การเกิดรอยแตกจากความล้าจะเริ่มจากจุดเล็ก ๆ ระดับผลึกหรือเกรน อาจเริ่มต้นเพียง 4-5 เกรน ทั้งที่บริเวณผิวนอก หรือภายในเนื้อวัสดุที่เป็นบริเวณความเค้นสูง ที่กล่าวว่า การล้าของโลหะจะเกิดการเสีรูปร่างที่พลาสติกเฉพาะที่ ซึ่งเป็นกลไกของการไถล (To-and-fro slip or plastic deformation, particularly at a local level) การแตกหักจากความล้าจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ มีลักษณะเส้นเป็นวงกลมคล้าย ๆ กับหาดทรายที่ถูกคลื่นกระทบที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดเริ่มต้นของรอยแตก เรียกบริเวณนี้ว่า Beach Mark การแตกจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของวัสดุลดลง ความเค้นที่เกิดจากแรงกระทำจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนเกินวัสดุจะทนได้ และเกิดการแตกขาดในที่สุด ซึ่งผิวที่แตกบริเวณนี้มีลักษณะขรุขระ เรียกบริเวณนี้ว่า Over load ขนาดของผิวที่แตกบริเวณนี้จะบ่งบอกถึงปริมาณความเค้นที่มากกระทำโดยประมาณ โดยที่พื้นที่บริเวณนี้มีขนาดเล็กแสดงว่าปริมาณความเค้นต่ำ แต่ถ้าพื้นที่บริเวณนี้มีขนาดใหญ่แสดงว่าปริมาณความเค้นสูง ดังรูปที่ 1.26



รูปที่ 1.26 ผิวหน้าการชำรุดแบบต่าง ๆ ที่มา: [19]

1.2.10 บทบาทของธาตุผสมแต่ละชนิดที่มีต่อคุณสมบัติของเหล็กกล้า

1.2.10.1 นิกเกิล (Ni) จัดเป็นธาตุที่เพิ่มเสถียรภาพให้กับออสเทนไนท์ โดยไม่รวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์มีบทบาทที่สำคัญ ดังนี้

- มีบทบาททำให้จุดยูเทคตอยด์ทั้งปริมาณคาร์บอนและอุณหภูมิต่ำลง ทำให้ปริมาณเฟอร์ไรต์มากขึ้นและเฟอร์ไรต์น้อยลง
- จากบทบาทของนิกเกิลดังกล่าวทำให้เหล็กมีเกรนละเอียด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของออสเทนไนท์เกิดที่อุณหภูมิต่ำลง
- เพิ่มคุณสมบัติความสามารถในการชุบแข็งให้กับเหล็กกล้า โดยทำให้ TTT diagram เคลื่อนไปทางขวา และลดอุณหภูมิอุณหภูมิการเปลี่ยนออสเทนไนท์เป็นมาร์เทนไซต์ (Ms) ให้ต่ำลง เหล็กกล้าที่ผสมนิกเกิลมากกว่า 3% อาจจะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์โดยการทำ Normalising
- เพิ่มความแข็งแรงและความแข็งโดยไม่ทำให้ความเหนียวลดลง

- เพิ่มคุณสมบัติทางด้านเชื่อมให้กับเหล็กกล้า (Weldability)
- ปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ
- ปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านผุกร่อนให้ดีขึ้น

1.2.10.2 แมงกานีส (Mn) เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มเดียวกับนิกเกิล ต่างกับนิกเกิลตรงที่สามารถรวมกับคาร์บอนให้แมงกานีสคาร์ไบด์ที่ทำหน้าที่ของแมงกานีสเปลี่ยนแปลงไปจากนิกเกิลบทบาทของแมงกานีสที่สำคัญมีดังนี้

- เปลี่ยนแปลงจุดยูเทคตอยด์ทั้งปริมาณคาร์บอนและอุณหภูมิให้ต่ำลง ทำให้ปริมาณเฟอร์ไรต์และเฟอร์ไรต์น้อยลง และมีส่วนทำให้เกรนละเอียดคล้ายคลึงกับนิกเกิล
- เพิ่มคุณสมบัติทางด้านความสามารถในการชุบแข็งให้กับเหล็กกล้าและมีผลรุนแรงกว่านิกเกิลถึง 2 เท่า
- เพิ่มความแข็งแรงและความแข็ง แต่มีส่วนทำให้ความเหนียวลดลง โดยแมงกานีสมีแนวโน้มที่จะแยกตัวอยู่ตามขอบเกรน

หมายเหตุ ในทางปฏิบัติไม่นิยมใช้แมงกานีสเป็นธาตุผสม ถึงแม้ว่าแมงกานีสจะมีราคาถูกกว่ามากก็ตามเพราะแมงกานีสมีข้อเสียที่จะต้องระมัดระวังอยู่หลายประการ คือ

- แมงกานีสมีบทบาททำให้เกิด Temper Brittleness ในขณะที่ทำการอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมิ 400-600 °C แมงกานีสจะรวมกับคาร์บอนให้แมงกานีสคาร์ไบด์ และมักจะตกผลึกจับตัวอยู่ตามขอบเกรนของเหล็กกล้าในลักษณะต่อเนื่องจากเกรนหนึ่งไปยังอีกเกรนหนึ่ง ซึ่งทำให้เหล็กกล้ามีคุณสมบัติเปราะไม่ทนต่อแรงกระแทก
- เนื่องจากแมงกานีสมีบทบาทในการเพิ่มเสถียรภาพให้กับออสเทนไนต์ ทำให้เกิดออสเทนไนต์เหลือค้างปริมาณมากภายหลังการชุบแข็ง ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงเป็นมาร์เทนไซต์ ในขณะที่ใช้งาน ทำให้เกิดการขยายตัวเล็กน้อย จะเกิดอันตรายจากการแตกร้าวได้ง่าย
- แมงกานีสมีแนวโน้มที่จะเกิดการแยกตัว (segregation) ได้ง่าย ซึ่งอาจจะไปรวมอยู่ตามเกรนหรือบริเวณใจกลางของแท่งเหล็ก (Ingot) ทำให้เหล็กมีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ

1.2.10.3 โครเมียม (Cr) เป็นธาตุอยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพของเฟอร์ไรต์ สามารถรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูงในเกณฑ์สูง มีบทบาทสำคัญเมื่อผสมให้เหล็กกล้าคาร์บอน ดังนี้

- มีบทบาททำให้จุดยูเทคตอยด์ มีคาร์บอนต่ำลง แต่กลับทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น
- เพิ่มคุณสมบัติทางด้านความสามารถในการชุบแข็งให้กับเหล็กกล้า
- เมื่อโครเมียมรวมตัวกับคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพ ทำให้เหล็กกล้า ทำให้เหล็กมีคุณสมบัติรักษาความแข็งแรงไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง

- เพิ่มคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อน

1.2.10.4 โมลิบดีนัม (Mo) เป็นธาตุอยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์ และรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์

- ลดปริมาณของคาร์บอนที่จุดยูเทคตอยด์ แต่กลับเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น
- เพิ่มคุณสมบัติทางด้านความสามารถในการชุบแข็ง เมื่อผสมไม่เกิน 1% แต่ถ้าผสมปริมาณมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการชุบแข็งลดลง
- สามารถรวมกับคาร์บอนให้โมลิบดีนัมคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง ทำให้เหล็กผสมโมลิบดีนัมทนความร้อนได้ดีโดยไม่สูญเสียความแข็งแรง
- ให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีเสถียรภาพสูงถึงอุณหภูมิประมาณ 600 °C ทำให้รักษาความแข็งไว้ได้ดีที่อุณหภูมิไม่เกิน 600 °C

- เพิ่มคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อน

1.2.10.5 วานาเดียม (V) จัดอยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์ และสามารถรวมตัวกับคาร์บอนได้ดีกว่าโมลิบดีนัม โดยวานาเดียมคาร์ไบด์ทั้งสองประเภทคอมเพล็กซ์ และชนิดพิเศษที่มีเสถียรภาพสูงมาก ไม่สลายได้ง่ายแม้อุณหภูมิสูง มีบทบาทที่สำคัญดังต่อไปนี้

- ลดปริมาณคาร์บอนที่จุดยูเทคตอยด์ แต่กลับเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น เช่นเดียวกับโครเมียม และ โมลิบดีนัม
- เพิ่มคุณสมบัติทางด้านความสามารถในการชุบแข็ง เมื่อผสมวานาเดียมไม่เกิน 0.04% เพราะปริมาณน้อยจะละลายได้ดีในเหล็กออสเทนไนท์
- วานาเดียมมีบทบาททำให้เหล็กกล้ามีเกรนละเอียดได้ดีมาก เนื่องจากวานาเดียมคาร์ไบด์มีเสถียรภาพสูงไม่สลายตัวได้ง่าย จึงทำหน้าที่ป้องกันการขยายตัวของออสเทนไนท์

- รักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง
- ป้องกันไม่ให้เกิด Ageing ในเหล็กที่มีไนโตรเจนปริมาณสูง

1.2.10.6 ไททาเนียม (Ti) เป็นธาตุในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์ และรวมตัวกับคาร์บอนได้ดีมากให้คาร์ไบด์ชนิดพิเศษที่มีเสถียรภาพอยู่ในเกณฑ์สูง มีบทบาทที่สำคัญดังต่อไปนี้

- เพิ่มคุณสมบัติทางด้านความสามารถในการชุบแข็ง เมื่อผสมในเหล็กปริมาณน้อยไม่เกิน 1%
- ลดคุณสมบัติทางด้านความสามารถในการชุบแข็ง เมื่อผสมให้เหล็กปริมาณสูงยกเว้นเมื่อเหล็กปริมาณคาร์บอนสูง
- ให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีเสถียรภาพสูง

- รวมตัวกับไนโตรเจนให้ไททาเนียมในทรายด์ที่มีความแข็งสูง

1.2.10.7 ซิลิกอน (Si) เป็นธาตุที่ไม่รวมกับคาร์บอนเมื่อผสมในเหล็ก เพราะจะรวมกับเหล็กได้ดีกว่าคาร์บอน ซิลิกอนจัดอยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์ มีบทบาทที่สำคัญดังนี้

- ละลายได้ดีในเฟอร์ไรต์ และเพิ่มความแข็งให้กับเฟอร์ไรต์ โดยเฉพาะเพิ่มจุดคลากของเหล็กให้สูงขึ้น
- ไม่มีบทบาทเพิ่มความสารณในการชุบแข็ง คือไม่มีผลทำให้ TTT diagram เคลื่อนไปทางซ้ายหรือขวา
- เพิ่มเสถียรภาพให้มาร์เทนไซต์ถึงอุณหภูมิประมาณ 500 °C
- คุณสมบัติทางด้านเชื่อมของเหล็กไม่ดีเมื่อผสมซิลิกอนสูง เพราะซิลิกอนจะรวมตัวกับออกซิเจนได้ง่ายมาก

1.2.10.8 โคบอลต์ (Co) ไม่รวมกับคาร์บอน และอยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพออสเทนไนท์ มีบทบาทดังนี้

- ละลายได้ดีในเฟอร์ไรต์ มีบทบาทเพิ่มความแข็งแรงให้กับเฟอร์ไรต์
- ลดความสารณในการชุบแข็ง คือ ทำให้ TTT diagram เคลื่อนมาทางซ้าย และทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงของออสเทนไนท์ไปเป็นมาร์เทนไซต์กลับสูงขึ้น
- มีคุณสมบัติรักษาความแข็งแรงไว้ได้ดีที่อุณหภูมิสูง

1.2.11 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) [20]

การทดสอบความแข็ง เป็นคุณสมบัติทางกลของวัสดุอีกค่าหนึ่งที่น่าสนใจอย่างกว้างขวาง โดยมีการทดสอบด้วยหลักการต่าง ๆ หลายรูปที่แบบ ซึ่งแต่ละแบบก็เหมาะกับงานแต่ละประเภทแตกต่างกัน ดังนี้

(1) Scratch หรือ Abrasion Method ใช้วัดความต้านทานต่อการขีดขูดของผิววัสดุแต่ละชนิดเปรียบเทียบกัน ตัวอย่างเช่น Moh's Scale ที่กำหนดให้ Talc มีความแข็งเป็น 1 และกำหนดให้เพชรมีความแข็งเป็น 10 Moh's Scale อีกตัวอย่างหนึ่ง คือ ตะไบเพื่อตรวจสอบชิ้นงานว่ามีความแข็งอยู่ในช่วงใดช่วงหนึ่งอย่างหยาบ ๆ

(2) Dynamic method เป็นการทดสอบโดยใช้แรงแบบ Dynamic กระทำกับชิ้นงานทดสอบ ตัวอย่างเช่น Scroroscope

(3) Static Method ใช้ทดสอบความต้านทานต่อการเกิด Plastic deformation ของผิวชิ้นงานทดสอบภายใต้ความดันแบบสถิตย์ (Static) ตัวอย่างของการทดสอบด้วยหลักการนี้

ได้แก่ การทดสอบแบบ Brinell, Vicker Rockwell, Knoop Durometer (ใช้ทดสอบวัสดุประเภทพลาสติก และยาง)

ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการทดสอบ Static Method แบบ Brinell Vicker และ Rockwell ซึ่งมีการใช้งานทางโลหะอย่างกว้างขวาง

1.2.11.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) มาตรฐาน สำหรับการทดสอบความแข็งแบบนี้ คือ ASTM E 10-96 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

หัวกด (Indenter) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 1, 2, 2.5, 5 และ 10 มิลลิเมตร โดยทำด้วยวัสดุชนิดต่าง ๆ กัน

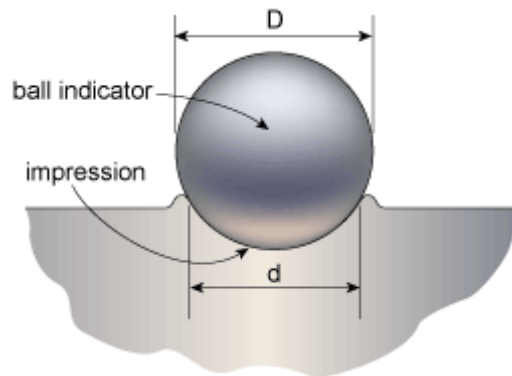
- Harden Steel Ball ใช้เหล็กทรงกลมชุบแข็งเป็นหัวกดทำให้สามารถทดสอบความแข็งได้ไม่เกิน 450 HB
- Tungsten Carbide Ball สามารถทดสอบความแข็งได้สูงขึ้นไปในช่วง 450-650 HB

แรงกด (Load) สำหรับมาตรฐานโดยทั่วไปใช้แรงกดขนาด 3000, 1500 และ 500 kgf ส่วนกรณีที่ต้องการใช้กับวัสดุอ่อนสามารถใช้แรงกดขนาด 250, 125 และ 100 kgf

การคำนวณค่าความแข็ง เมื่อใช้แรงขนาดที่กำหนด กดผ่านหัวกด ในระยะเวลาที่กำหนด กดผิวชิ้นงานทดสอบ แล้ววัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยกด (รูปที่ 1.27) นำมาคำนวณเป็นค่าความแข็งตามสูตร ดังนี้

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1.23)$$

เมื่อ	P	=	แรงกด	(kg)
	D	=	ขนาดหัวกด	(mm.)
	d	=	ขนาดรอยกด	(mm.)



รูปที่ 1.27 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล

(ที่มา: <http://www.twi.co.uk/content/jk74.html>, สืบค้นเมื่อ 11/01/53)

1.2.11.2 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) มาตรฐานสำหรับการทดสอบความแข็งแบบนี้ คือ ASTM E 92-82 (Reapproved) โดยมีรายละเอียด ดังนี้

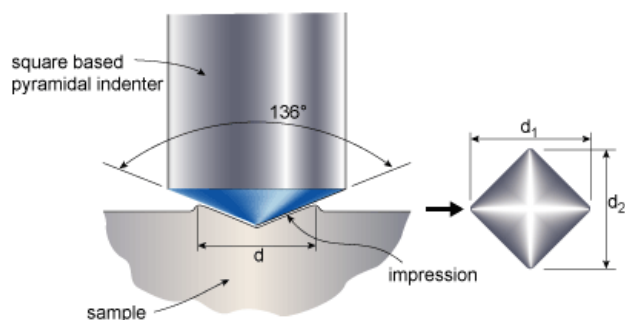
หัวกด (Indenter) เป็นเพชรรูปที่พีระมิดฐานสี่เหลี่ยมด้านเท่า มีมุมระหว่างหน้าพีระมิด 136°

แรงกด (Load) สำหรับมาตรฐานโดยทั่วไปใช้แรงกดขนาด 1-120 kgf (กรณีที่ใช้แรงกด 1-1000 gf จะแยกเป็นอีกมาตรฐานเรียกว่า Microhardness Testing ซึ่งมีรายละเอียดกำหนดไว้ใน ASTM E 384-89)

การคำนวณค่าความแข็ง เมื่อใช้แรงขนาดที่กำหนด กดผ่านหัวกด ในระยะเวลาที่กำหนด กดบนผิวชิ้นงานทดสอบ แล้ววัดความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกด (รูปที่ 1.28) นำไปคำนวณออกมาเป็นค่าความแข็ง ดังสมการ 1.24

$$HV = \frac{2P \sin \frac{\theta}{2}}{d^2} = \frac{1.8544}{d^2} \quad (1.24)$$

เมื่อ	P	=	แรงกด	(kg)
	d	=	เส้นทแยงมุม	(mm.)
	θ	=	136°	



รูปที่ 1.28 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

(ที่มา: <http://www.twi.co.uk/content/jk74.html>, สืบค้นเมื่อ 11/01/53)

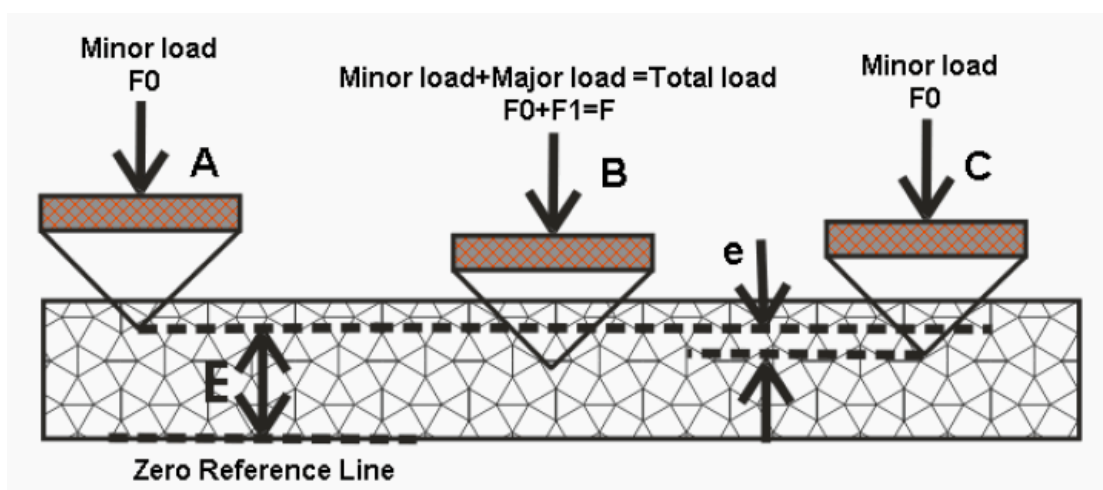
1.2.11.3 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test)

มาตรฐานสำหรับการทดสอบความแข็งแบบนี้ คือ ASTM E 18-97 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

หัวกด (Indenter) มี 2 แบบ คือ

- เพชรรูปที่กรวย (Diamond Cone) มีมุมระหว่างหน้าของผิวกรวย 120°
- Harden Steel Ball ขนาด $1/16$, $1/8$, $1/4$ และ $1/2$ นิ้ว

แรงกด (Load) สำหรับมาตรฐานโดยทั่วไปใช้แรงกดขนาด 60, 100 และ 150 kgf และมีขนาดลดลงเป็น 15, 30 และ 45 kgf สำหรับ Rockwell Superficial Hardness เป็นการทดสอบที่มีหลายชนิดหัวกด และแรงกดหลายขนาดจึงสามารถแบ่งย่อยเป็นหลายสเกลย่อย



รูปที่ 1.29 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล

(ที่มา: <http://home.iitk.ac.in/~kamalkk/ME-371.htm>, สืบค้นเมื่อ 11/01/53)

1.3 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงล้าของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าที่เชื่อมยาก มีดังนี้

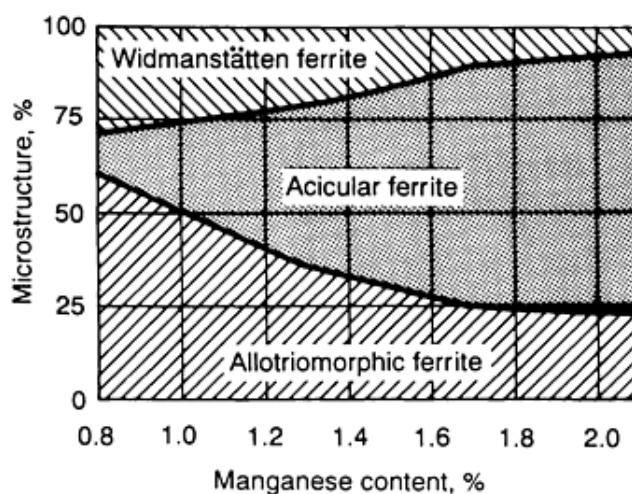
Woei-Shyan Lee และ Tzay-Tian Su [21] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง AISI 4340 ภายใต้สภาวะการชุบ (Quenched) และการอบคืนตัว (Tempered) โดยเผาเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิ 850 °C นาน 30 นาที แล้วชุบในน้ำมันเพื่อให้ได้โครงสร้างเป็น quench martensite หลังจากนั้นอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400, 500 และ 650 °C นาน 2 และ 48 ชั่วโมงตามลำดับ พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็งแรงลดลงเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น ส่วนโครงสร้างจุลภาคจะเกิดการพรีซิพิตของคาร์ไบด์มีลักษณะโครงสร้างคล้ายจาน (Plate-like) ที่อุณหภูมิต่ำ แต่มีโครงสร้างคล้ายรูปที่กลมรี (Spheroid-like) ที่อุณหภูมิสูง

G. Magudeeswaran et al. [22] ได้ศึกษาผลกระทบของกระบวนการเชื่อมและลวดเชื่อมในการเชื่อมเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการชุบและอบคืน (เกรด AISI 4340) ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และกรรมวิธีเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ โดยใช้ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก (austenitic stainless steel) และลวดเชื่อมเหล็กกล้าเฟอร์ริติกไฮโดรเจนต่ำ (Low hydrogen ferritic steel) ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อ พบว่าลวดเชื่อม ลวดเชื่อมเหล็กกล้าเฟอร์ริติกไฮโดรเจนต่ำ มีค่าความแข็งแรงล้าเพิ่มขึ้น 13% เมื่อเปรียบเทียบกับลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก ส่วนกรรมวิธีเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ให้ ค่าความแข็งแรง ล้าสูงกว่ากรรมวิธีเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ถึง 6% และมีความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงสูง โครงสร้างจุลภาคในบริเวณเนื้อเชื่อม ที่ใช้ลวดเชื่อมเหล็กกล้าเฟอร์ริติกไฮโดรเจนต่ำ มีค่าความแข็งแรง ล้าที่ดีกว่าลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เนื่องจากเนื้อเชื่อมที่ใช้ลวดเชื่อมเหล็กกล้าเฟอร์ริติกไฮโดรเจนต่ำมีขนาดเกรนละเอียดกว่าเนื้อเชื่อมที่ใช้ ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก และความร้อนในการเชื่อมและอัตราการเย็นตัวจะมีผลกระทบต่อสัณฐานวิทยา (morphology) ได้แก่ ขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของเฟอร์ไรต์ และเฟอร์ไรต์จะมีขนาดเกรนละเอียดเมื่อปฏิบัติงานในการเชื่อมเพิ่มและอัตราการเย็นตัวลดลง

D.P. Fairchild et al. [23] ได้รายงานในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางจุลภาคและความเหนียว (Toughness) ของบริเวณ ICHAZ (Intercritical HAZ) ในการเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำแรงดึงสูงโดยกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์คใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding)

โดยค่าความเหนียวในบริเวณ ICHAZ จะลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ - ออสเทนไนต์ (Martensite-Austenite) ขึ้นในบริเวณ ICHAZ ซึ่งการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์-ออสเทนไนต์เป็นผลมาจากความเค้นและซีลิกอนในเหล็กกล้า

P. Ravi Vishnu [24] กล่าวว่าเป็นที่ทราบกันดีว่าในการพัฒนาลวดเชื่อมตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้เน้นการเพิ่มปริมาณของ Acicular ferrite ในโครงสร้างจุลภาค พบว่าการลดปริมาณ grain boundary ferrite และ ferrite sideplate ปริมาณ Acicular ferrite จะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 30



รูปที่ 30 ผลของปริมาณแมงกานีสในเนื้อเชื่อมซึ่งสัมพันธ์กับจำนวนโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้น
ที่มา: [24]

V. B. da Tringade et al [25] ได้รายงานผลการทำ Normalizing heat treatment เนื้อเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำซึ่งเชื่อมด้วย กรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์คใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding) ใช้ลวดเชื่อม AWS A.5.23-97 ซึ่งใช้ฟลักซ์แตกต่างกัน 4 ชนิด คือ CMn (1.2%Mn) CMnMo (1.7%Mn 0.5%Mo) CMnMoCr (0.5%Mn 0.5%Mo 1.3%Cr) และ CMnMoTiB (1.2%Mn 0.5%Mo 0.16%Ti 0.01%B) พบว่าเนื้อเชื่อม ที่ใช้ฟลักซ์ CMn จะมีโครงสร้าง proeutectoid boundary ferrite 32%, polygonal ferrite 14%, aligned side plate ferrite 27% และ acicular ferrite 25% ส่วนเนื้อเชื่อมที่เพิ่ม 0.05%Mn ในฟลักซ์ โครงสร้าง acicular ferrite เพิ่มขึ้นเป็น 42% และ polygonal ferrite เพิ่มขึ้นเป็น 19% ส่วนโครงสร้างอื่นลดลง เนื้อเชื่อม ที่ใช้ฟลักซ์ CMnMoTiB มีโครงสร้าง acicular ferrite เพิ่มขึ้นเป็น 76% ซึ่งผลกระทบของธาตุ Mo Ti และ B จะทำให้เกรนในโครงสร้างจุลภาคละเอียดขึ้น ส่วนการเพิ่ม 1.06%Cr จะเพิ่มปริมาณ โครงสร้าง Acicular ferrite เล็กน้อยและปริมาณ Cr เพิ่มขึ้นจะเพิ่มปริมาณ โครงสร้าง Side plate ferrite และ Proeutectoid ferrite

และ Mn จะมีผลกระทบมากกว่า Cr ในการลดอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสออสเทนไนต์ไปเป็นเฟอร์ไรต์ ส่วนการทำ Normalizing heat treatment จะเปลี่ยนโครงสร้างเนื้อเชื่อมไปเป็นโครงสร้าง เฟอร์ไรต์ และเฟอร์ไรต์-คาร์ไบด์

J.C.F. Jorge et al. [26] ได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณโครเมียมต่อความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและค่าความเหนียว (Toughness) ของเนื้อเชื่อมชั้นเดียว ในการเชื่อมเหล็กกล้า C-Mn ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์คใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding) พบว่าเมื่อปริมาณของโครเมียมเพิ่มขึ้นสัดส่วนของ Acicular ferrite เพิ่มขึ้นในตอนต้นและสัดส่วนของ Allotrimorphic ferrite ลดลงอย่างต่อเนื่อง ก่อนถูกแทนที่ด้วย ferrite with second phase และท้ายสุดจะเกิดมาร์เทนไซต์ เฟอร์เซ็นต์ของบริเวณ reheat เป็นปัจจัยที่ควบคุมค่าความเหนียว (Toughness) เพราะว่าบริเวณ Columnar มีค่าต้านทานแรงกระแทกต่ำแม้ว่ามีปริมาณ acicular ferrite สูงก็ตาม สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและค่าความเหนียว (Toughness) ในเนื้อเชื่อมชั้นเดียวจะขึ้นอยู่กับจำนวนองค์ประกอบของโครงสร้างมาร์เทนไซต์/ออสเทนไนต์

C.H. Lee et al [27] ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนรูปที่อย่างถาวร (Plastic deformation) ต่อการเปลี่ยนเฟสออสเทนไนต์เป็น Acicular ferrite ในเหล็ก Fe -Mn - Si - C การเปลี่ยนเฟส Acicular ferrite ถูกให้ความร้อนใหม่และสัดส่วนของ Acicular ferrite ถูกลดลง ในการเปลี่ยนรูปที่ออสเทนไนต์อย่าง Plastically ซึ่งเป็นกลไกการเปลี่ยนแบบ Displacive การเพิ่มแรงขับทางเคมีสำหรับการเปลี่ยนแปลงเนื่องจาก Undercooling มีขนาดใหญ่ต่างอุณหภูมิ เริ่มเปลี่ยนเป็นเบนไนต์เอาชนะ dislocations ในการป้องกันการเจริญเติบโตของ Acicular ferrite

Sudarsanam Suresh Babu. [28] ศึกษากลไกการ นิวคลีเอชัน ของ Acicular ferrite ในเนื้อเชื่อม พบโครงสร้าง Acicular ferrite มีค่าความแข็งแรง (Strength) และค่าความเหนียว (Toughness) สูงสุด กลไกที่เป็นไปได้มากที่สุดสำหรับการนิวคลีเอชันของโครงสร้าง Acicular ferrite ที่ inclusion

T. Pan. [29] ได้รายงานผลการศึกษา จลนศาสตร์และกลไกของการนิวคลีเอท Intragranular ferrite ที่ Non-metallic inclusions ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ พบว่าอุณหภูมิ Acicular ferrite นิวคลีเอทได้เร็วที่สุดประมาณ 550°C ขณะที่อุณหภูมิสำหรับ Acicular ferrite มีขนาดใหญ่ที่สุดประมาณ 600 °C

W.W. Bose Filho et al. [30] ศึกษาผลกระทบของโลหะเจือต่อโครงสร้างจุลภาค และ inclusion ของเนื้อเชื่อมหลายชั้นในการเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดหุ้มฟลักซ์และกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์คใต้ฟลักซ์ พบว่าการเพิ่มไททาเนียมในช่วง 50-400 ppm. จะไม่ส่งผลต่อการพัฒนาโครงสร้างจุลภาค แต่การเพิ่มทั้งไททาเนียมและ เพิ่มนิกเกิล

molybdenum และโครเมียม โครงสร้างจุลภาค จะเปลี่ยนจากการผสมของ allotriomorphic ferrite, Widmanstätten ferrite, acicular ferrite และ microphases เป็นการผสม acicular ferrite, bainite, martensite คาร์บอนต่ำและ microphases. ค่าความแข็งสูงในบริเวณ reheated เนื่องจากจำนวนโครงสร้างเบนไนท์และมาร์เทนไซต์ใหญ่ ในเนื้อเชื่อมยังมีอสเทนไนท์ตกค้างอยู่ ส่วน inclusion เป็น $MnOSiO_2$ เมื่อเพิ่มไททานเนียมในเนื้อเชื่อม จะนำไปสู่การเพิ่ม ไททานเนียม ใน inclusion ด้วย ดังนั้นองค์ประกอบหลักของ inclusion อาจจะเป็น $MnOSiO_2$, Ti_2O_3 และ TiO

De-liang Ren et al. [31] ศึกษาผลกระทบของส่วนผสมลวดเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาคและค่าความเหนียว (Toughness) ของเนื้อเชื่อมท่อเหล็กกล้าซึ่งเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์คใต้ฟลักซ์ พบว่าความร้อนในการเชื่อมเพิ่ม ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณของโลหะเจือในลวดเชื่อมเพื่อไปยับยั้งการเปลี่ยนเฟสของ grain boundary ferrite และเพิ่มการเกิด acicular ferrite ในเกรนอสเทนไนท์ โดยที่โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย acicular ferrite ในบริเวณรอยต่อของเนื้อเชื่อม four-wire submerged arc welding ซึ่งใช้ลวดเชื่อมที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ส่งผลให้เนื้อเชื่อมมีค่าความเหนียวสูงที่อุณหภูมิต่ำ

M.H. Avazkonandeh-Gharavol et al. [32] ได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณทองแดงต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเนื้อเชื่อมหลายชั้น ในการเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำ Cr-Ni-Cu ด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ใช้ลวดเชื่อม E8010G โดยโครงสร้างจุลภาคจะแบ่งออกเป็น 3 องค์ประกอบ ได้แก่ Primary ferrite (PF) Grain boundary ferrite และ Intragranular polygonal ferrite with second phase (FS) ประกอบไปด้วยขอบเกรนทั้งหมดนิวกลิเอท lath-like morphology ของเฟอร์ไรท์ และ intergranular acicular ferrite พบว่าจำนวน acicular ferrite เพิ่มขึ้นที่บริเวณ columnar และ coarse-grained reheated ปริมาณทองแดง 0.53 และ 0.94 %wt ให้ค่าความแข็ง และค่าความแข็งแรงดึงสูง เนื่องจากการแข็งตัวของสารละลายของแข็ง การเลื่อนตำแหน่งของชั้นตอนการแข็งตัวและความละเอียดของโครงสร้างจุลภาค การตกตะกอนของ ϵ -copper ส่วน Charpy V-notch impact toughness ลดซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งและค่าแรงดึง

S. Mukhopadhyay et al. [33] ได้ศึกษาผลกระทบของส่วนผสมแก๊สคลุมต่อการเชื่อมแบบสลับเปลือยอิเล็กโทรดของเหล็กกล้าแรงดึงสูง โดยใช้ลวดเชื่อมตันและลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ พบว่าโครงสร้างจุลภาคในเนื้อเชื่อมประกอบด้วย acicular ferrite, Grain Boundary Ferrite และ Ferrite with Sideplate ในเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าแรงดึงสูง มีอิทธิพลจากออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สคลุม โดย acicular ferrite มีประมาณ 46-57 %vol. Grain Boundary Ferrite มีประมาณ 19-38 %vol. และ Ferrite with Sideplate มีประมาณ 6-16 %vol.

J. Onoro. [34,35] ได้วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเนื้อเชื่อมของเหล็ก 9-12%Cr เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ขนาด 3.25 มิลลิเมตร อุณหภูมิระหว่างการเชื่อม 200-250°C และ PWHT ที่ 760°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าวิธีที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดโครงสร้าง delta ferrite ในเนื้อเชื่อมเพื่อได้รับโครงสร้าง martensitic อย่างสมบูรณ์คือ ลดธาตุที่จะฟอร์มเฟอร์ไรท์ให้ต่ำที่สุดที่เป็นไปได้ ส่วนการแทนที่ของ Mo สำหรับ W ลดความเสี่ยงการเกิด delta ferrite และคาดว่าปรับปรุงพฤติกรรมทางกลที่อุณหภูมิสูง

ณรงค์ฤทธิ์ โทชรรัตน์ และ คณะ [36] ได้ศึกษาอิทธิพลของการให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อมบริเวณผลกระทบจากความร้อน (Heat affect zone; HAZ) ต่ออัตราการขยายตัวของรอยแตกจากความล้าของเหล็กกล้าผสมต่ำ เกรด AISI 4340 พบว่าในการเชื่อมชิ้นงานเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ต้องควบคุมโครงสร้างจุลภาคบริเวณ ผลกระทบจากความร้อน ควรให้เป็นเทมเปอร์เบนไนท์ ไม่ควรให้เป็นมาร์เทนไซด์ ซึ่งโอกาสจะเกิดการแตกร้าวได้สูง และโครงสร้างจุลภาคบริเวณผลกระทบจากความร้อนที่ให้ความร้อนก่อนเชื่อมที่ 350°C คล้ายกับโครงสร้างจุลภาคเดิมที่เป็นเทมเปอร์เบนไนท์ และความแข็งใกล้เคียงกับความแข็งก่อนเชื่อม

P. Muangjunburee. [37,38] ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางโลหะวิทยาของการเชื่อมพอกเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง AISI 4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อม หุ้มฟลักซ์ ใช้ลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำ E11018 โดยให้อุณหภูมิก่อนเชื่อม 250, 300, 350 และ 380°C พบว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว ส่วนค่าความแข็งจะขึ้นอยู่กับสภาวะการอุณหภูมิก่อนเชื่อม อุณหภูมิที่ให้อ่อนเชื่อม 380°C ให้ค่าความแข็งและโครงสร้างที่ดีที่สุด ต่อมาได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางโลหะวิทยาของการเชื่อมพอกเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง AISI 4340 โดยให้อุณหภูมิหลังการเชื่อม ซึ่งกรรมวิธีการเชื่อมและลวดเชื่อมเหมือนกับการศึกษาตอนต้น พบว่าโครงสร้างจุลภาคหลังจากให้ความร้อนหลังเชื่อมในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนเป็นโครงสร้างแบบเทมเปอร์ ส่วนค่าความแข็งบริเวณที่ให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมต่ำกว่าที่ไม่ได้รับความร้อนจากการเชื่อม ซึ่งโครงสร้างจุลภาคและค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมที่ให้ความร้อนก่อนเชื่อม 350°C และอุณหภูมิก่อนเชื่อม 550°C ดีที่สุด

W. Wang et al. [39] ศึกษาเหล็กกล้าเกรด X70 ที่โครงสร้างเป็น polygonal ferrite และเหล็กท่อเกรด X90 โครงสร้างเป็น Acicular ferrite พบว่าความแข็งแรงของเหล็กกล้า Acicular ferrite มี thermo-mechanical controlled processing ดี ซึ่งความแข็งแรงสูงและค่าความเหนียวที่ดีเป็นผลมาจากขนาดเกรนละเอียดและความหนาแน่นสูงของ dislocation และ subboundaries

I. Madariaga et al. [40] ได้รายงานการเกิด Acicular ferrite ในเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางในการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง 2 ระดับ พบว่าโครงสร้าง Acicular ferrite สังเกตได้โดย

กระบวนการ isothermal และการเย็นตัวอย่างต่อเนื่องในเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง การขัดขวางการเกิดขอบเกรนเบนไนท์ทำให้สามารถสร้างโครงสร้าง Acicular ferrite อย่างสมบูรณ์ได้ ถึงแม้ว่าอัตราการเย็นตัวสูง (30 °C/s) ต้องการหลีกเลี่ยงการเกิด allotriomorphic ferrite อย่างสมบูรณ์ ส่วนอัตราการเย็นตัวต่ำเป็นสาเหตุการพัฒนาของเฟสอื่น ๆ ได้แก่ allotriomorphic ferrite และเพอร์ไรต์ แต่ปริมาณสัดส่วนโดยปริมาตรของ Acicular ferrite ยังสูงอยู่เนื่องจากการกระตุ้นโดยอัตราการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง 2 ระดับ

T. Pan et al. [41] กล่าวว่าโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่อุณหภูมิ 550 °C จะเป็นโครงสร้าง Acicular ferrite ผสมกับเบนไนท์ ซึ่งที่อุณหภูมิประมาณ 550 °C โครงสร้าง Acicular ferrite เกิดอย่างรวดเร็ว ขณะที่อุณหภูมิสำหรับ Acicular ferrite มีขนาดใหญ่ที่สุดประมาณ 600 °C

1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.4.1 เพื่อศึกษาสมบัติด้านโลหะวิทยา เช่น โครงสร้างทางจุลภาค และความแข็งแรงกล้าของเนื้อเชื่อม (Weld Metal) จากการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมกและกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์
- 1.4.2 เพื่อหากรรมวิธีเชื่อมซ่อมที่ให้คุณสมบัติด้านการล้าที่ดีที่สุด ระหว่างการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก /แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ เพื่อกำหนดวิธีการเชื่อมให้เป็นมาตรฐานในการซ่อมอะไหล่

1.5 ขอบเขตการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการต้านความแข็งแรงล้าบริเวณเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำเกรด AISI 4340 โดยสร้างชิ้นทดสอบจากเนื้อเชื่อม 3 กระบวนการเชื่อมต่าง ๆ ดังนี้ กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กระบวนการเชื่อมมิก/แมก และกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ทราบโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อเชื่อมและบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน(HAZ) จากกรรมวิธีการเชื่อมแต่ละวิธี
- 1.6.2 ทราบความแข็งแรงล้าและค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมจากกรรมวิธีการเชื่อมแต่ละวิธี
- 1.6.3 ทราบกรรมวิธีการเชื่อมซ่อมที่เหมาะสมที่สุดเพื่อป้องกันการแตกหักเนื่องจากการล้า

1.7 สถานที่ทำการวิจัย

- 1.7.1 ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- 1.7.2 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
- 1.7.3 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทที่ 2

วิธีการดำเนินการวิจัย

วัตถุประสงค์และขอบเขตในการดำเนินการวิจัยมุ่งศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งและความแข็งแรงล้าของเนื้อ เชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 จากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึง วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และขั้นตอนการดำเนินการวิจัย โดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.1 วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

2.1.1 เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340

เหล็กกล้า AISI 4340 จัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมต่ำ ซึ่งผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคืนตัว ทำให้มีคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมกับงานผลิตชิ้นส่วนเครื่องกล สำหรับงานหนักซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีและสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าผสมต่ำ แสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340

ธาตุผสม (Alloying elements)	เปอร์เซ็นต์ (%)
C	0.39
Mn	0.74
Si	0.19
P	0.024
S	0.019
Mo	0.23
Ni	1.72
Cr	0.8

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340

คุณสมบัติเชิงกล		หมายเหตุ
ความแข็งแรงดึง (MPa)	1044	Quenched & Tempered
ความแข็งแรงคราก (MPa)	918	
อัตราการยืดตัว (%)	16.2	
การลดของภาคหน้าตัด (%)	42.9	
ความแข็ง (HV)	320-340	

(ที่มา: Krupp Hoesch Stahlxpost GmbH, Test Certificate No. 5/24496, Date : 05/1201995, Test required : AS PER DIN 50049-3.1B)

2.1.2 ลวดเชื่อม

ลวดเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมมีด้วยกัน 3 ชนิด แบ่งตามกรรมวิธีการเชื่อม ดังนี้

(1) ลวดเชื่อมสำหรับกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ใช้ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน ANSI/AWS A5.5-69 E11018-G H 4R เส้นผ่าศูนย์กลาง 4.0 มิลลิเมตร ซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีและสมบัติเชิงกลของเนื้อเชื่อม แสดงในภาคผนวก

(2) ลวดเชื่อมสำหรับกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก ใช้ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน ER110S-G เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติเชิงกลของลวดเชื่อม แสดงในภาคผนวก

(3) ลวดเชื่อมสำหรับกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์เป็นลวดเชื่อมตามมาตรฐาน E110T5-K4H4 เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติเชิงกลของลวดเชื่อม แสดงในภาคผนวก

2.1.3 เครื่องเชื่อม

เครื่องเชื่อมเป็นระบบอินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Fronius รุ่น TransPuls Synergic 2700 Alu-Edition ควบคุมตัวแปรการเชื่อมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์และซอฟต์แวร์ของเครื่องเชื่อม สามารถปรับตัวแปรในการเชื่อมได้โดยตรงจากหน้าจอของเครื่องเชื่อม ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เครื่องเชื่อม

2.1.4 ชุดผสมแก๊ส (Gas Mixer) และแก๊ส (Gas)

เครื่องผสมแก๊สที่ซื้อหือ Witt-Gasetechnik รุ่น BM-2M (รูปที่ 2.2) ใช้สำหรับผสมแก๊สระหว่างแก๊สอาร์กอน (Ar) กับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งสามารถปรับอัตราส่วนผสมแก๊สได้รายละเอียดต่าง ๆ แสดงในภาพผนวก



รูปที่ 2.2 เครื่องผสมแก๊ส (ที่มา <http://www.hellopro.fr/Melangeur-de-gaz-bm-2m-2001669-335819-produit.html>)

2.1.5 เครื่องขัดชิ้นงาน

เครื่องขัดชิ้นงานที่ใช้เป็นของบริษัท METKON รุ่น DIGISET-2V เป็นจานกลมขนาด 8 นิ้ว สามารถติดตั้งได้ทั้งกระดาษทรายและผ้าขัด ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบและทิศทางการหมุนของงานขัดได้ แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เครื่องขัดชิ้นงาน

2.1.6 กล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้เป็นชนิดที่เหมาะสมกับงานทางโลหะวิทยา ซึ่งใช้กล้อง 2 ลักษณะ คือ

- (1) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) มีกำลังขยายตั้งแต่ 50-800 เท่า ยี่ห้อ Nikon ดังรูปที่ 2.4
- (2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



รูปที่ 2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ที่มา:
<http://www.directindustry.com/pr...074.html>, สืบค้นเมื่อ 15/12/52)

2.1.7 เครื่องทดสอบความแข็งแรงล้าแบบคานหมุน

เครื่องทดสอบที่ใช้เป็นของบริษัท

Ratnakar enterprises มีความเร็วรอบ 4,200 รอบ

ต่อนาที ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เครื่องทดสอบความล้าแบบคานหมุน

2.1.8 เครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาค

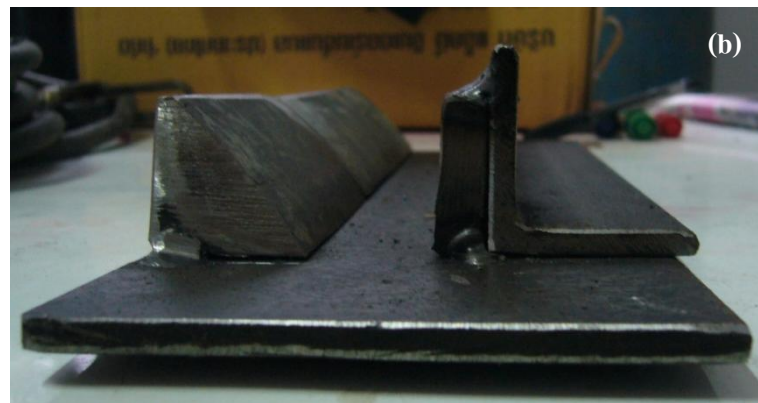
เครื่องทดสอบความแข็ง ระดับจุลภาค เป็นเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker) หัวกดเป็นรูปที่ปรัามิคมุม 136°C สามารถปรับแรงกดได้ตั้งแต่ 5-1000 kgf ดังรูปที่ 2.7



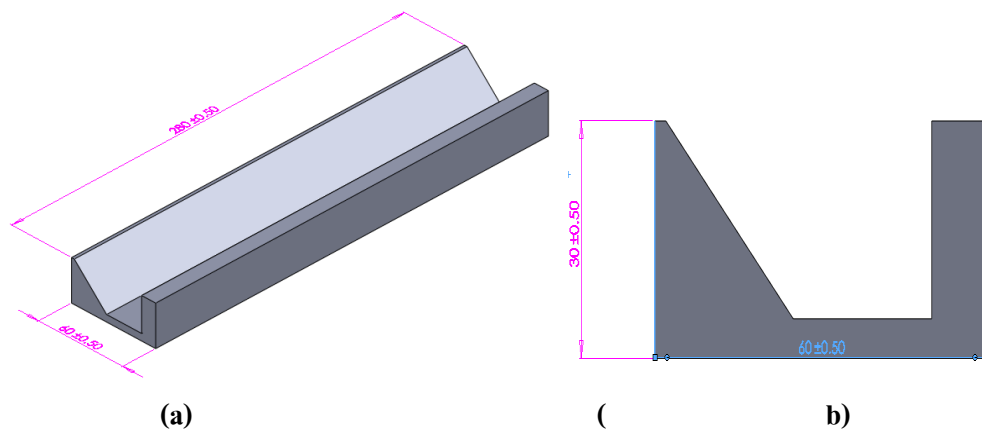
รูปที่ 2.7 เครื่องทดสอบความแข็ง

2.2 การเตรียมชิ้นงานเชื่อม

ตัดชิ้นงานเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ายาว 250 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร และตัดเป็นสามเหลี่ยม ยาว 250 มิลลิเมตร ฐานกว้าง 250 มิลลิเมตร นำมาประกอบ ดังรูปที่ 2.8 ขนาดชิ้นงานที่ประกอบ แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 ชิ้นงานก่อนการเชื่อมพอก (a) ด้านบน (b) ด้านหน้า



รูปที่ 2.9 ขนาดชิ้นงานก่อนการเชื่อมพอก (a) ด้านข้าง (b) ด้านหน้า

2.3 กรรมวิธีการเชื่อม

2.3.1 นำชิ้นงานในข้อ 2.2 ไปให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) ที่ 350 °C

2.3.2 เชื่อมพอกชิ้นงานในข้อ 2.3.1 จนเต็มรอยบาก ประมาณ 52 แนว ในทำราบด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้ม ฟลักซ์ แสดงดังรูปที่ 2.10 เป็นการเชื่อมมือ กรรมวิธีการเชื่อมมิก /แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์เป็นการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ แสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งตัวแปรในการเชื่อมแต่ละกรรมวิธีการเชื่อม แสดงในตารางที่ 2.3 ประกอบด้วยชนิดลวดเชื่อม อุณหภูมิในการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม อุณหภูมิในการอบลวดเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เพื่อไล่ไฮโดรเจนในฟลักซ์ ชนิดแก๊สคลุม อัตราการไหลของแก๊สคลุม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเชื่อม กระแสเชื่อม แรงดัน ความเร็วในการเชื่อม และความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม

ตารางที่ 2.3 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมทั้ง 3 กระบวนการ

Parameter	Unit	MMA	MAG	FCAW
Electrode Types (AWS)	-	E11018-G H 4R	ER110S-G	E110T5-K4H4
Preheat temperature	°C	350	350	350
Electrode baking temperature	°C for 1 hr.	350	-	-
Shielding gas	-	-	80%Ar +20%CO ₂	80%Ar +20%CO ₂
Mixer gas flow rate	l/min.	-	12	12
Filler diameter	mm.	4	1.2	1.2
Current	A	145	205-220	210-230
Voltage	V	26	22	23.5
Welding speed	mm./min.	160	300	300
Heat input	kJ/mm.	1.06	0.81-0.87	0.89-0.97

ข้อสังเกต: ในระหว่างการเชื่อมมีการควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการเชื่อม (Interpass temperature) ไม่ให้ต่ำกว่า 350 °C

2.3.3 หลังจากการเชื่อมเสร็จ (รูปที่ 2.12) นำชิ้นงานเชื่อมไปให้ความร้อนหลังเชื่อม (Post weld heat treatment) ทันที ที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวภายในเตา

จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้องจึงนำไปเตรียมชิ้นทดสอบความแข็งแรงด้าและโครงสร้าง
จุลภาค



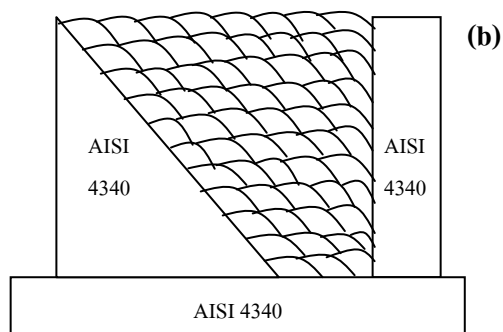
รูปที่ 2.10 กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์



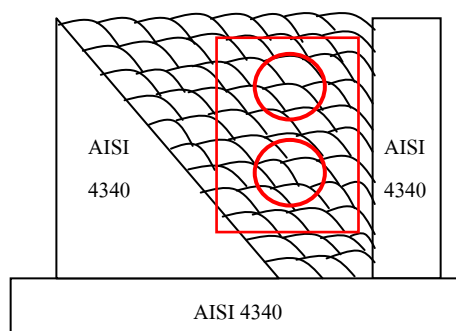
รูปที่ 2.11 กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมไส้ฟลักซ์ซึ่งเป็นการเชื่อม
แบบกึ่งอัตโนมัติ

2.4 การเตรียมชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้า

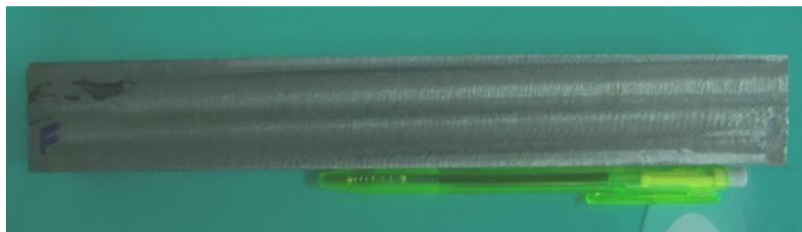
2.4.1 ตัดชิ้นงานเชื่อม ให้เหลือเฉพาะบริเวณเนื้อเชื่อม เป็นแท่งสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 2.13 เนื้อเชื่อมพอกก่อนนำไปเตรียมชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.12 ชิ้นงานเชื่อมพอก (a) ชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้ว (b) แบบจำลองแนวเชื่อม

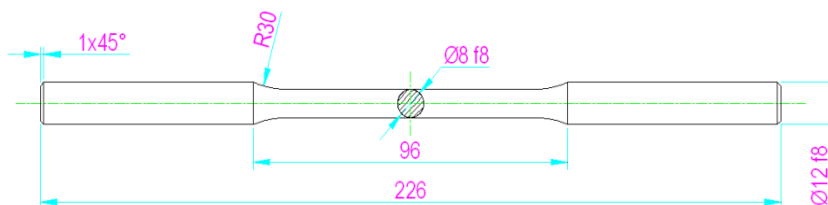


รูปที่ 2.13 บริเวณที่ตัดเนื้อเชื่อมพอกนำไปเตรียมชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้า



รูปที่ 2.14 เนื้อเชื่อมพอกก่อนนำไปเตรียมชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้า

2.4.2 นำชิ้นงานที่ได้ในข้อ 2.4.1 ไปกลึงโดยใช้เครื่อง CNC ให้ได้ขนาด ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งวงกลมในรูปที่ 2.13 เป็นบริเวณที่นำไปกลึงทำชิ้นทดสอบความล้า รูปที่ 2.16 แสดงชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าที่กลึงเสร็จแล้ว



รูปที่ 2.15 ขนาดชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้า



รูปที่ 2.16 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้า

2.4.3 นำชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้า ที่กลึงเสร็จแล้วมาขัดผิวให้เรียบ ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,200 โดยขัดตามแนวนอน เพื่อลดรอยจากการกลึงซึ่งอาจจะส่งผลในขณะทดสอบความแข็งแรงล้า ดังรูปที่ 2.17

2.5 วิธีทดสอบความแข็งแรงล้า

การทดสอบความแข็งแรงล้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นการทดสอบความแข็งแรงล้าที่ไม่มีรอยบาก ซึ่งในการทดสอบชิ้นงานมีการทดสอบ ดังนี้

- (1) ทดสอบชิ้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้า ด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์
- (2) ทดสอบชิ้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก
- (3) ทดสอบชิ้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม ไร้ฟลักซ์
- (4) ทดสอบชิ้นงานที่เตรียมจากเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340

ทดสอบโดยการเปลี่ยนน้ำหนัก ซึ่งค่าโมเมนต์ดัด และค่าความเค้นปกติ ตามตารางที่ 2.4 โดยเปลี่ยนน้ำหนักทดสอบ 6 ค่า แต่ละค่าทดสอบ 2 ตัวอย่าง



รูปที่ 2.17 การขัดชิ้นทดสอบก่อนทดสอบความแข็งแรงล้า

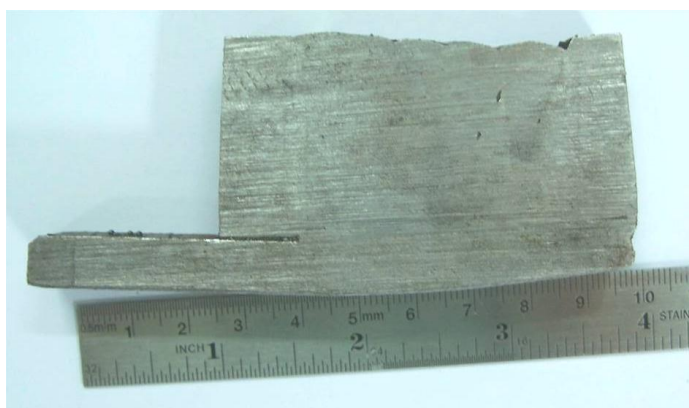
ตารางที่ 2.4 ค่าน้ำหนัก โมเมนต์ตัด และค่าความเค้นปกติ

น้ำหนัก (กก.)	โมเมนต์ดัด (นิวตัน-เมตร)	ค่าความเค้นปกติ (เมกะปาสกาล)
35.2	1.76	350
40.2	2.01	400
50.3	2.515	500
60.3	3.015	600
70.3	3.515	700
80.4	4.02	800

2.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบ โครงสร้างจุลภาค มีดังนี้

2.6.1 ตัดชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมทั้ง 3 กรรมวิธีเชื่อม หนาประมาณ 1 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ชิ้นงานเชื่อมที่ตัดไปทดสอบ โครงสร้างจุลภาค

2.6.2 หล่อชิ้นทดสอบที่ผ่านกรรมวิธีการเชื่อมทั้งสามกรรมวิธี ด้วยเรซิน โดยใช้อัตราส่วนผสมของเรซินและตัวเร่งปฏิกิริยา 5:1 รอจนกระทั่งเรซินแห้ง

2.6.3 ขัดชิ้นทดสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 120 180 360 600 800 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ

2.6.4 นำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้สิ่งแปลกปลอมที่ติดมาจากการขัดกระดาษทรายน้ำออก

2.6.5 ขัดชิ้นทดสอบด้วยผ้าสักหลาดที่มีผงอลูมินาขนาดอนุภาค 5 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ (รูปที่ 2.19) นำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคเป็นเวลา 5 นาทีอีกครั้ง เพื่อให้ผงอลูมินาที่ติดอยู่ออก

2.6.6 นำชิ้นทดสอบมากัดผิวหน้าด้วยสารละลาย 2% ไนตริก ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังนี้
กรดไนตริก 5 มิลลิลิตร และน้ำ 190 มิลลิลิตร เป็นระยะเวลา 10 วินาที ล้างด้วยน้ำสะอาด เป่าลมให้แห้ง

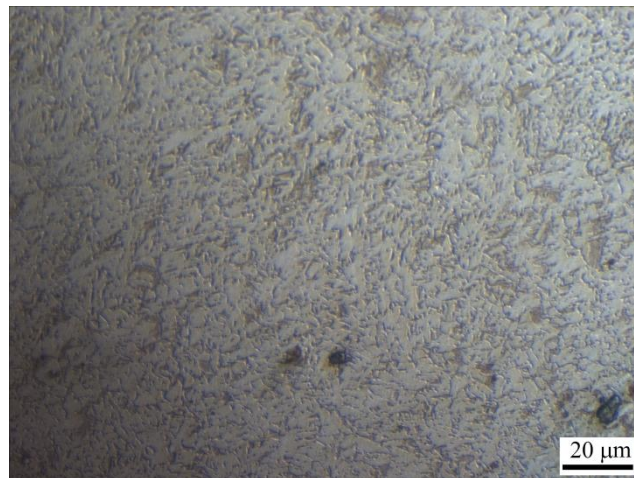
2.6.7 ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบ บริเวณเนื้อเดิม (เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340) บริเวณเส้นหลอมละลาย บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อม ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) ด้วยกำลังขยาย 100 200 และ 500 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 2.19 การขัดชิ้นงานด้วยผงอลูมินา

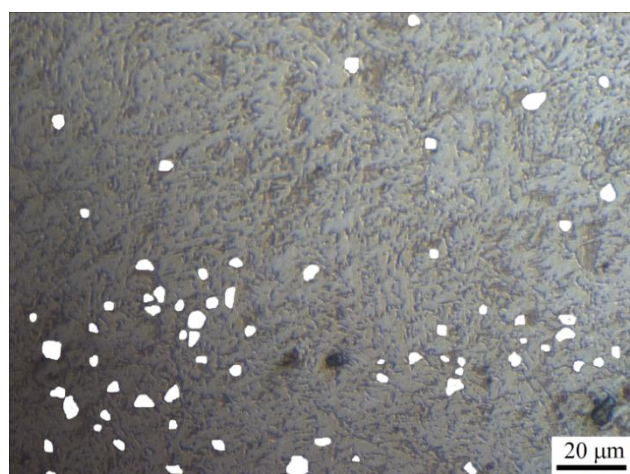
2.7 การวิเคราะห์หาปริมาณโครงสร้างจุลภาค

2.7.1 นำภาพโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อม หุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก /แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงในบริเวณที่แตกต่างกันทั่วทั้งชิ้นทดสอบที่กำลังขยาย 500 เท่า ดังรูปที่ 2.20 มาลบโครงสร้าง Polygonal ferrite ออก ด้วยโปรแกรมอะโดบีโฟโต้ช็อปซีเอส2 (Adobe Photoshop CS2) เนื่องจากโครงสร้าง Polygonal มีลักษณะค่อนข้างจะกลมจึงเป็นโครงสร้างที่ลบง่ายที่สุด ดังรูปที่ 2.21

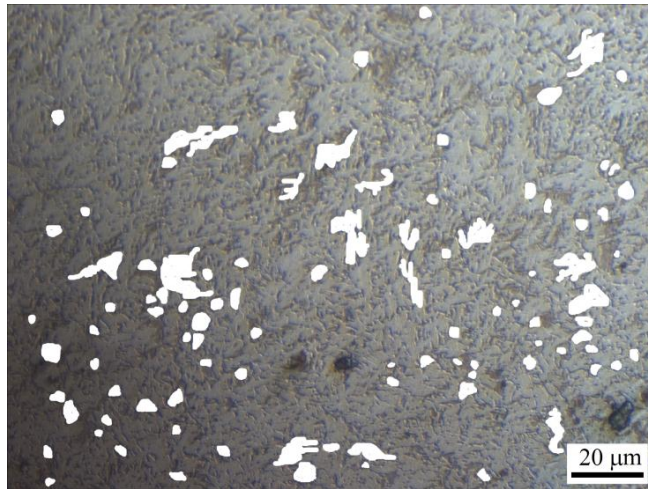


รูปที่ 2.20 โครงจุลภาคของเนื้อเชื่อมที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 500 เท่า

- 2.7.2 นำรูป 2.21 ที่ลบโครงสร้าง Polygonal ferrite ออกแล้ว มาลบโครงสร้าง Sideplate ferrite ออกด้วยโปรแกรมอะโดบีโฟโต้ช็อปซีเอส 2 (Adobe Photoshop CS2) ให้เหลือเฉพาะโครงสร้าง Acicular ferrite ดังรูปที่ 2.22
- 2.7.3 นำรูปที่ 2.21 ไปหาเปอร์เซ็นต์โครงสร้างด้วยโปรแกรม UTHSCSA Image tool โดยโปรแกรมจะบอกเปอร์เซ็นต์ของเฟสสีขาวซึ่งเป็นปริมาณโครงสร้าง Polygonal ferrite และเฟสสีดำเป็นปริมาณโครงสร้าง Acicular ferrite และโครงสร้าง Sideplate ferrite ดังรูปที่ 2.23

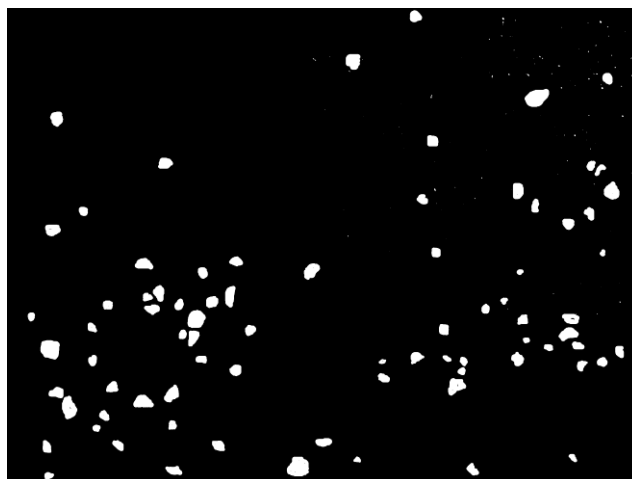


รูปที่ 2.21 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมที่ประกอบไปด้วยโครงสร้าง Acicular ferrite และโครงสร้าง Sideplate ferrite

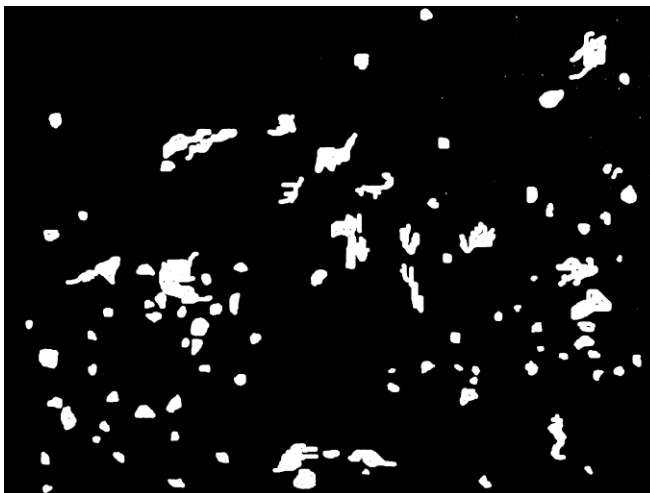


รูปที่ 2.22 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมที่เหล็เฉพาะโครงสร้าง Acicular ferrite

- 2.7.4 นำรูปที่ 2.22 ไปหาเปอร์เซ็นต์โครงสร้างด้วยโปรแกรม UTHSCSA Image tool โดยโปรแกรมจะบอกเปอร์เซ็นต์ของเฟสสีขาวซึ่งเป็นปริมาณโครงสร้าง Polygonal ferrite และโครงสร้าง Sideplate ferrite ส่วนเฟสสีดำนั้นเป็นโครงสร้าง Acicular ferrite อย่างเดียว ดังรูปที่ 2.24
- 2.7.5 นำเปอร์เซ็นต์ของโครงสร้าง Acicular ferrite และโครงสร้าง Polygonal ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของโครงสร้าง Sideplate ferrite



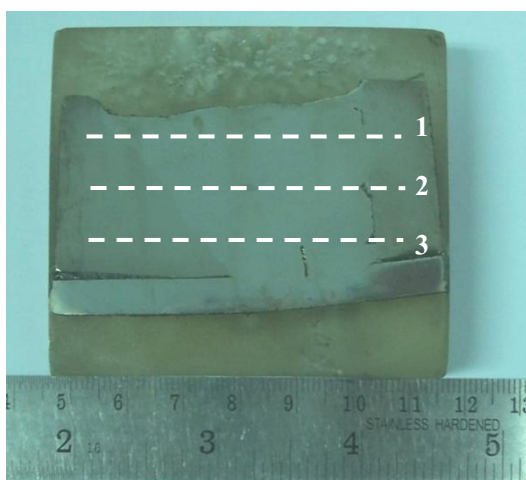
รูปที่ 2.23 โครงสร้าง Polygonal (สีขาว) โครงสร้าง Acicular ferrite และ Sideplate ferrite (สีดำ)



รูปที่ 2.24 โครงสร้าง Polygonal และ Sideplate ferrite (สีขาว) โครงสร้าง Acicular ferrite (สีดำ)

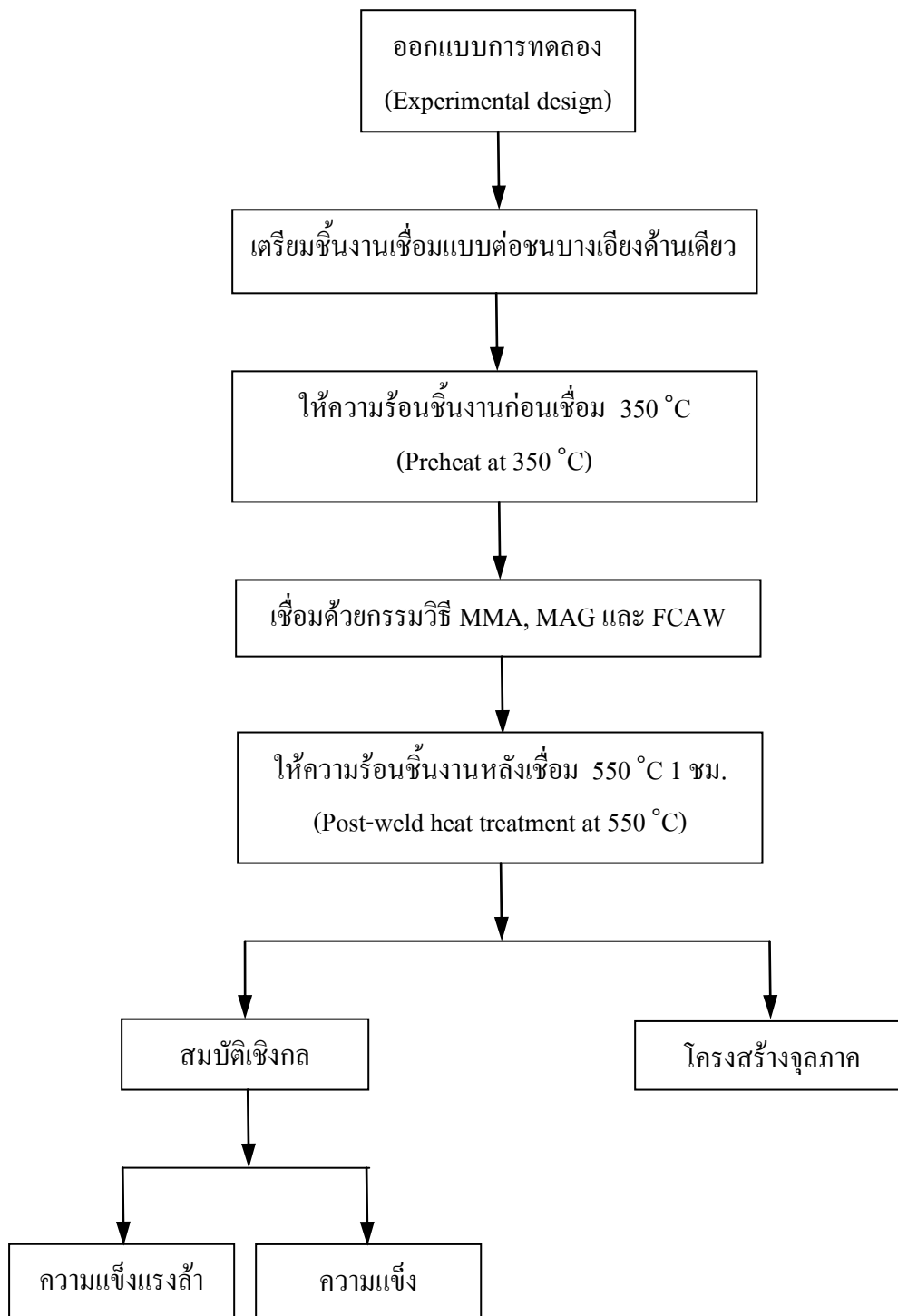
2.8 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งเป็นการทดสอบระดับจุลภาค ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E384-89(1997) Microhardness of materials โดยทดสอบชิ้นงานเชื่อมพอกเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก /แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ เริ่มวัดค่าความแข็งจาก บริเวณเนื้อโลหะเดิม บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อม ซึ่งวัดทุก ๆ 0.5 มิลลิเมตร 3 แนว ดังรูปที่ 2.25 โดยใช้แรงกด 500 กิโลกรัมแรง เวลากดแช่ 10 วินาที กำลังขยายในการวัดรอยกด 100 เท่า



รูปที่ 2.25 แนวการวัดค่าความแข็ง

2.9 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยโดยสรุป



รูปที่ 2.21 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยโดยย่อ

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อม ส่วนที่สองจะเป็นการทดสอบสมบัติเชิงกล คือ การทดสอบความแข็งแรงดึง และความแข็ง

3.1 ผลการตรวจส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อม

เพื่อให้ทราบส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีการเชื่อมทั้งสามกรรมวิธี คือ กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ จึงนำไปตรวจหาส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมด้วยเครื่อง OES (Optical Emission Spectrometer) ซึ่งส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ แสดงในตารางที่ 3.1 ตามลำดับ

จากตาราง 3.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ ซึ่งเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 มีธาตุผสมหลัก ๆ คือ นิกเกิล โครเมียม และ โมลิบดีนัม จากส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมทั้งสามกรรมวิธีการเชื่อมก็มี นิกเกิล โครเมียม และ โมลิบดีนัม เป็นส่วนผสมเช่นเดียวกัน แต่ปริมาณแตกต่างกัน โดยที่ปริมาณนิกเกิลในเนื้อเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมกจะสูงกว่าเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 แต่เนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์มีปริมาณนิกเกิลต่ำกว่าเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340

แมงกานีสเป็นธาตุผสมอีกชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากเป็นธาตุที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเนื้อเชื่อม แต่จะมีส่วนในการลดความเหนียว อีกประการหนึ่งที่เป็นบทบาทสำคัญของแมงกานีสในเนื้อเชื่อม คือ จับตัวกับออกซิเจนเกิดเป็น เฟสภายในเนื้อเชื่อม ในเนื้อเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่เริ่มเกิดโครงสร้าง Acicular ferrite ตามคำกล่าวของ P. Ravi Vishnu จากตารางที่ 3.1 พบว่า

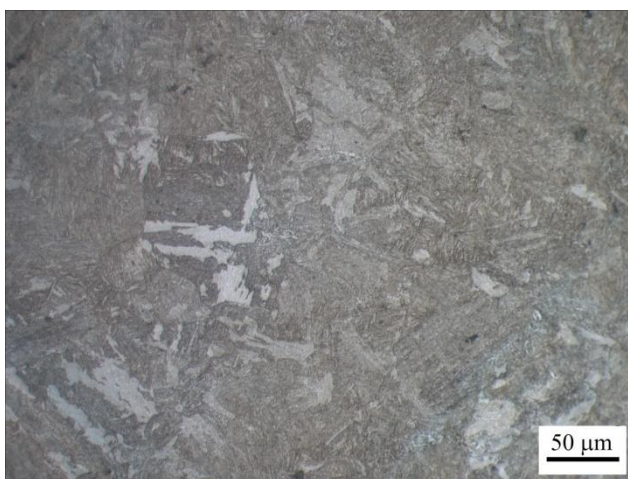
ปริมาณของแมงกานีสในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมกมีปริมาณใกล้เคียงกัน แต่มีปริมาณน้อยกว่าเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ ธาตุอีกชนิดหนึ่งที่จะก่อให้เกิด เฟสภายในเนื้อเชื่อม ในเนื้อเชื่อมตามคำกล่าวของ P. Ravi Vishnu คือ ไททาเนียม พบว่าเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ชนิดเดียวที่มีส่วนประกอบของไททาเนียม ถึงแม้เป็นปริมาณที่น้อยก็ตาม จึงส่งผลให้เนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์มีปริมาณโครงสร้าง Acicular ferrite และค่าความแข็งสูงกว่าเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก /แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์

ธาตุผสม (Alloying elements)	MMA (%)	MIG/MAG (%)	FCAW (%)
C	0.0761	0.0731	0.0729
Si	0.4692	0.4792	0.4652
S	0.0091	0.0087	0.0098
P	0.0091	0.0088	0.019
Mn	1.1440	1.1638	1.3212
Ni	2.3967	2.4553	1.3063
Cr	0.2531	0.2553	0.2174
Mo	0.3729	0.3801	0.2079
V	0.0040	0.0039	0.0838
Cu	0.0714	0.0722	0.0612
W	0.0145	0.0145	0.0098
Sn	0.0031	0.0030	Ti 0.0244
Co	0.0099	0.0097	0.0063
Zn	0.0059	0.0057	-

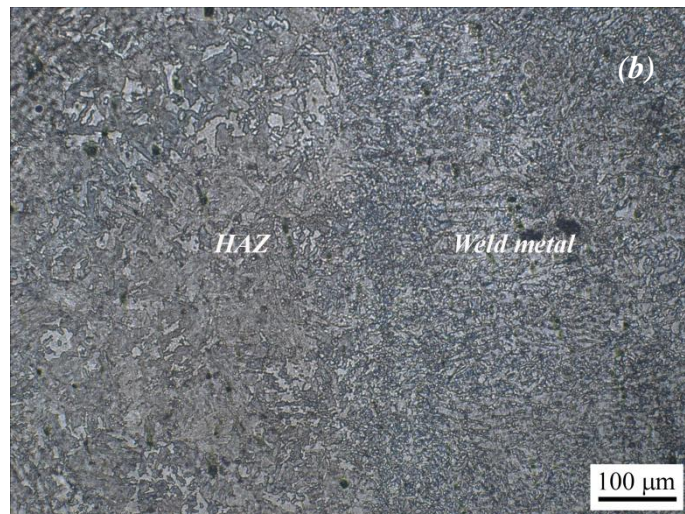
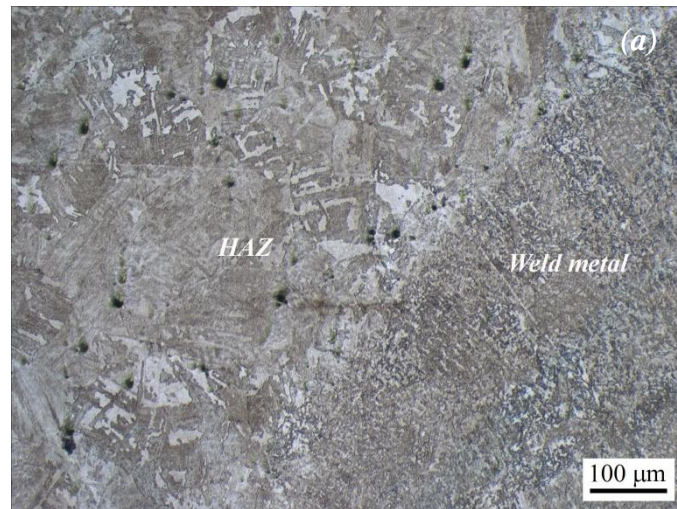
3.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ซึ่งผ่านกระบวนการ Quenched และ Tempered เป็นโครงสร้างเทมเปอร์เบนไนต์ (Temper bainite) ที่กำลังขยาย 200 เท่า ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยแถบของเฟอร์ไรต์ (α) (สีขาว) และแถบของคาร์ไบด์ที่มีลักษณะละเอียดรวมตัวกันอย่างหนาแน่นคล้ายแท่งเข็ม

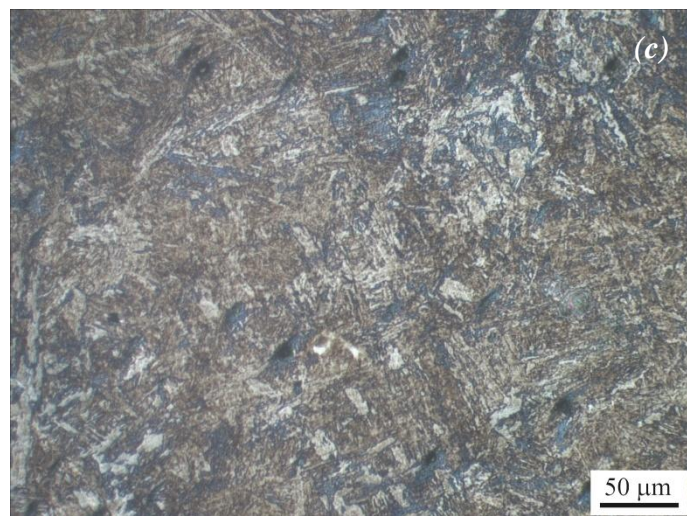
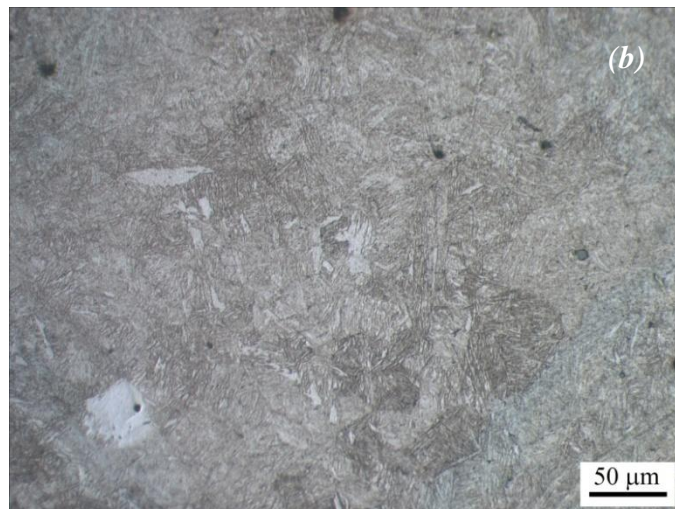
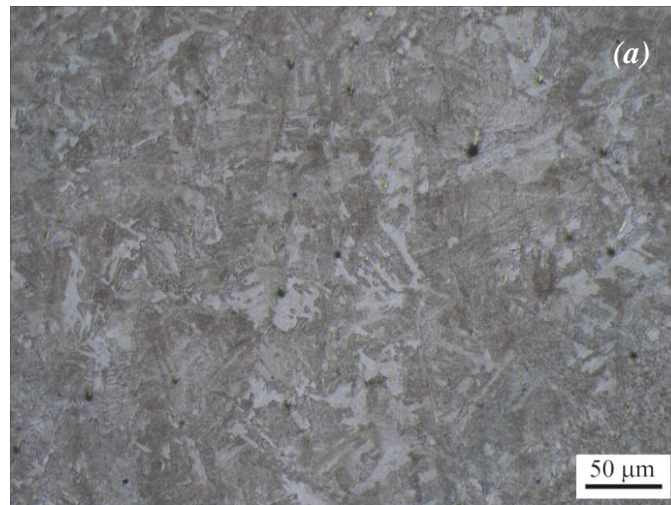


รูปที่ 3.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ที่ผ่านการ Quenched และ Tempered

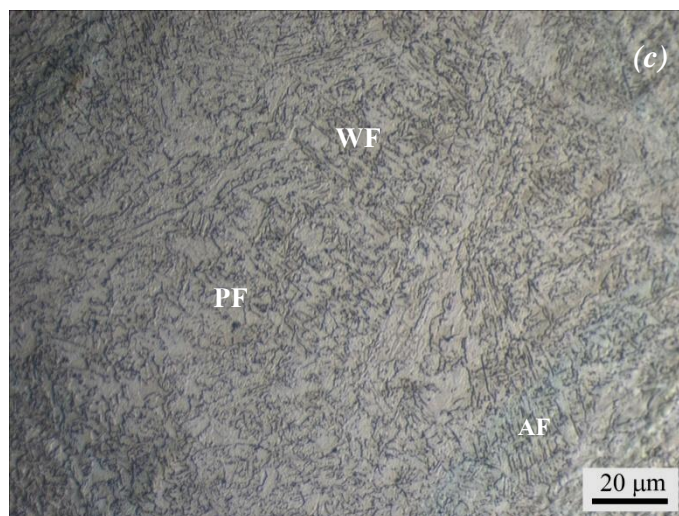
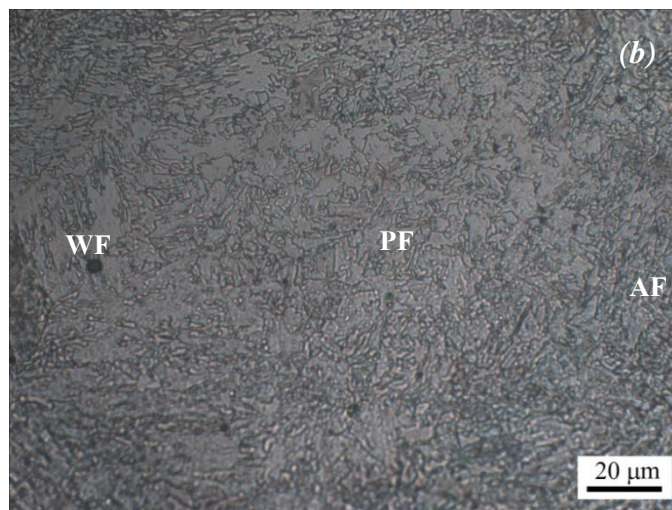
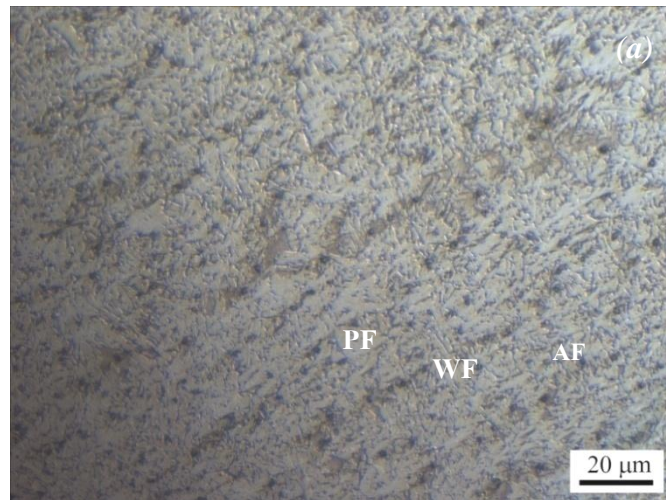
ความร้อนจากกรรมวิธีการเชื่อมบริเวณบ่อหลอมละลายสูงถึง 1,600 °C ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคบริเวณติดกับบ่อหลอมละลายเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีเส้นหลอมละลายกั้นอยู่ระหว่างบริเวณบ่อหลอมละลายและบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ซึ่งโครงสร้างจุลภาคบริเวณเส้นหลอมละลายแสดงในรูปที่ 3.2 โดยรูปที่ 3.2(a) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณเส้นหลอมละลายที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ รูปที่ 3.2(b) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณเส้นหลอมละลายที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก /แมกและรูปที่ 3.2(c) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณเส้นหลอมละลายที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ ซึ่งโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนและบริเวณเนื้อเชื่อมทั้งสามกรรมวิธีการเชื่อมแตกต่างกัน โดยที่โครงสร้างบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนเป็นเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ ส่วนบริเวณที่เป็นเนื้อเชื่อมโครงสร้างจะมีลักษณะเป็นเคนไรต์ ในรูปที่ 3.2 นี้ภาพมีกำลังขยายต่ำจึงไม่สามารถแยกโครงสร้างของเนื้อเชื่อมว่าเป็นชนิดใด



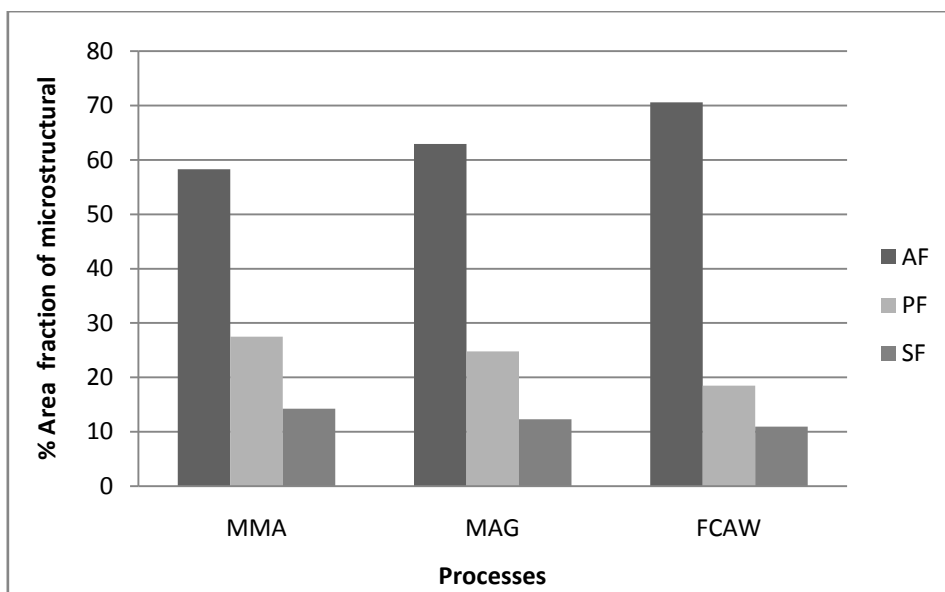
รูปที่ 3.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเส้นหลอมละลาย (a) MMA (b) MAG (c) FCAW



รูปที่ 3.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (a) MMA (b) MAG (c) FCAW



รูปที่ 3.4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม (a) MMA (b) MAG (c) FCAW



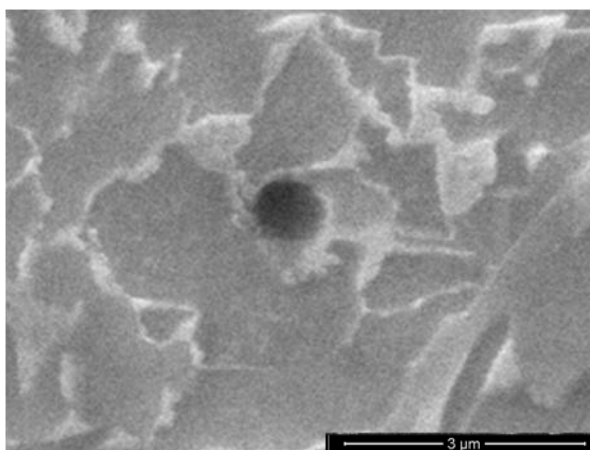
รูปที่ 3.5 สัดส่วนของโครงสร้างจุลภาคแต่ละชนิดกับกรรมวิธีการเชื่อม

จากรูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (รูปที่ 3.3a) กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก (รูปที่ 3.3b) และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (รูปที่ 3.3c) โครงสร้างจุลภาคของบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนทั้งสามกรรมวิธีเชื่อมเป็นโครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ ลักษณะเป็นรูปเข็มแหลม (needle-like pattern) และแผ่นสีขาวนั้นเป็นออสเทนไนท์ที่ยังเหลืออยู่ ซึ่งกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมกโครงสร้างมีลักษณะเป็นรูปเข็มละเอียดหนาแน่นเต็มพื้นที่ ส่วนโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์มีลักษณะเป็นลักษณะเป็นรูปเข็มสลับกับแผ่นของออสเทนไนท์ (สีขาว)

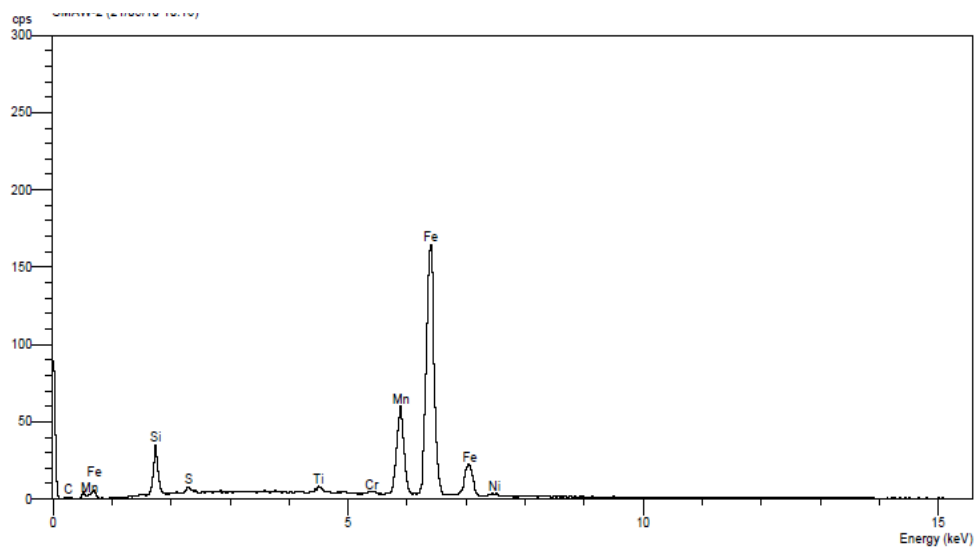
จากรูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของเนื้อเชื่อมหลายชั้นที่เชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (รูปที่ 3.4a) กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก (รูปที่ 3.4b) และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ (3.4b) ซึ่งเป็นการเชื่อมหลายชั้นทำให้ความร้อนจากแนวเชื่อมชั้นถัดไปอบคืนตัวแนวเชื่อมก่อนหน้าบางส่วน ส่งผลให้บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนเป็นบริเวณไม่กว้างเหมือนกับการเชื่อมชั้นเดียว โดยที่โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมทั้งสามกรรมวิธีการเชื่อมประกอบด้วยโครงสร้าง Acicular ferrite เป็นส่วนใหญ่ มีลักษณะเป็นเฟอร์ไรต์รูปเข็มสานกันเหมือนตะกร้า นอกจากนี้ยังพบโครงสร้าง Polygonal ferrite ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นเฟอร์ไรต์ขนาดเล็กค่อนข้างกลม และโครงสร้าง Widmanstatten ferrite หรือ Sideplate ferrite มีลักษณะเป็นเฟอร์ไรต์รูปเข็มออกมาจากขอบเกรน ซึ่งสัดส่วนของโครงสร้าง

จุลภาคแต่ละชนิดมีปริมาณที่ต่างกันในแต่ละกรรมวิธีการเชื่อม ดังรูปที่ 3.5 โดยที่กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์จะให้โครงสร้าง Acicular ferrite สูงสุด เมื่อเทียบกับกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ เนื่องจากเนื้อเชื่อมที่เชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์มีปริมาณแมงกานีส (ตารางที่ 3.1) สูงกว่าเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และยังมีไททานเนียมซึ่งไม่พบในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก ซึ่งธาตุทั้งสองชนิดนี้จะฟอร์มตัวเป็น เฟสภายในเนื้อเชื่อม ภายในเนื้อเชื่อมตามคำกล่าวของ W.W Bose Filho และคณะ เฟสภายในเนื้อเชื่อม เหล่านี้จะเป็นบริเวณที่เริ่มเกิดโครงสร้าง Acicular ferrite

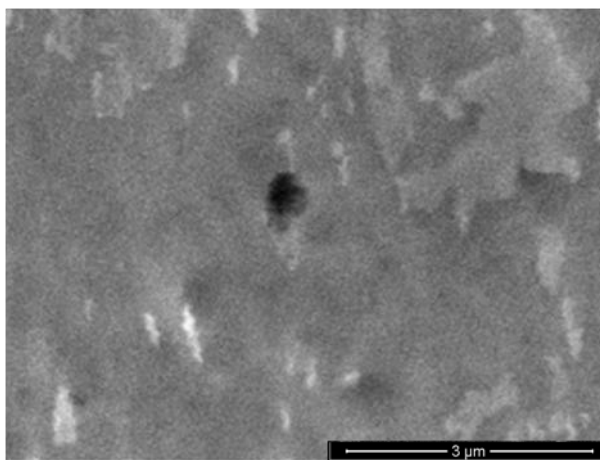
ความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (1.06 kJ/mm.) สูงกว่าความร้อนที่ใช้ในกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก (0.81-0.87 kJ/mm.) และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (0.87-0.97 kJ/mm.) ซึ่งความร้อนในการเชื่อมจะส่งผลต่ออัตราการเย็นตัวในเนื้อเชื่อม โดยที่ความร้อนในการเชื่อมสูงอัตราการเย็นตัวก็จะช้าลง เหมือนกับ G. Magudeeswaran et al. ได้กล่าวไว้ว่าความร้อนในการเชื่อมและอัตราการเย็นตัวจะมีผลกระทบต่อลักษณะวิทยา (morphology) ได้แก่ ขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของเฟอไรต์ และเฟอไรต์จะมีขนาดเกรนละเอียดเมื่อพลังงานในการเชื่อมเพิ่มและอัตราการเย็นตัวลดลง



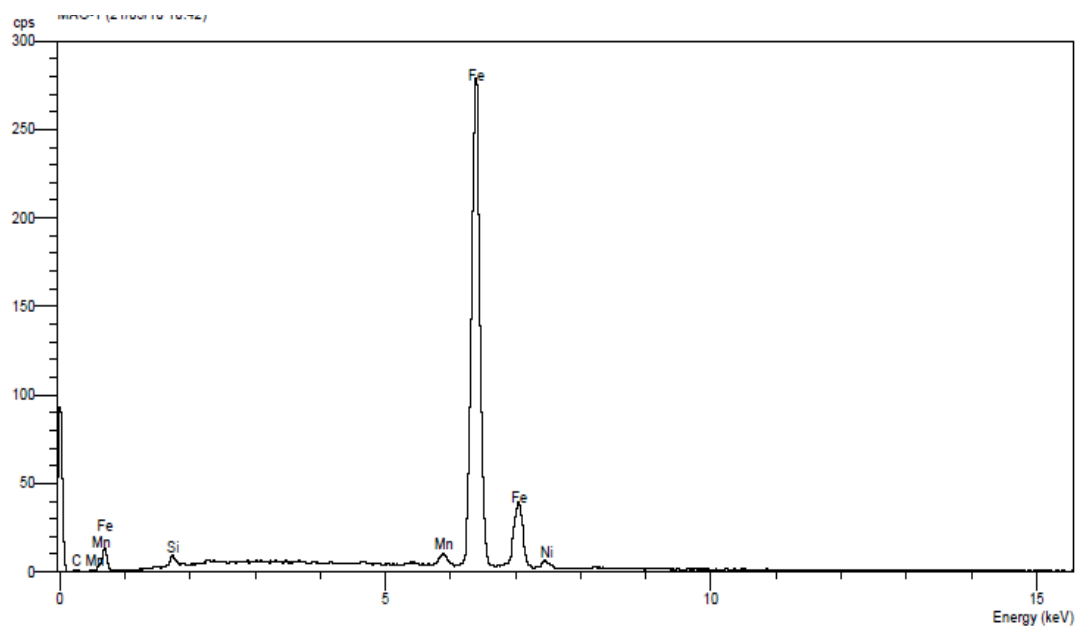
รูปที่ 3.6 โครงสร้างจุลภาคของ เฟสภายในเนื้อเชื่อม ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (MMA)



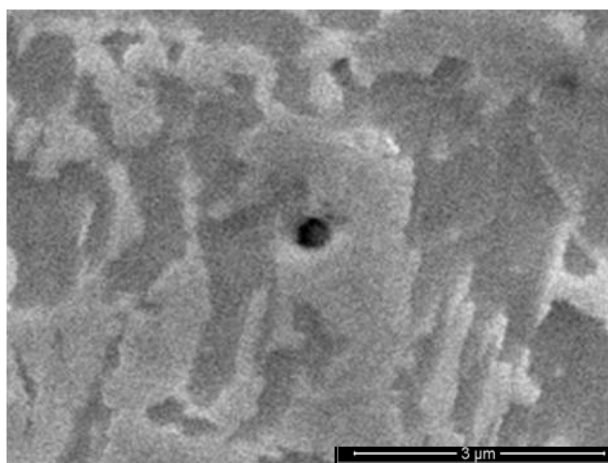
รูปที่ 3.7 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน เฟสภายในเนื้อเชื่อม ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (MMA)



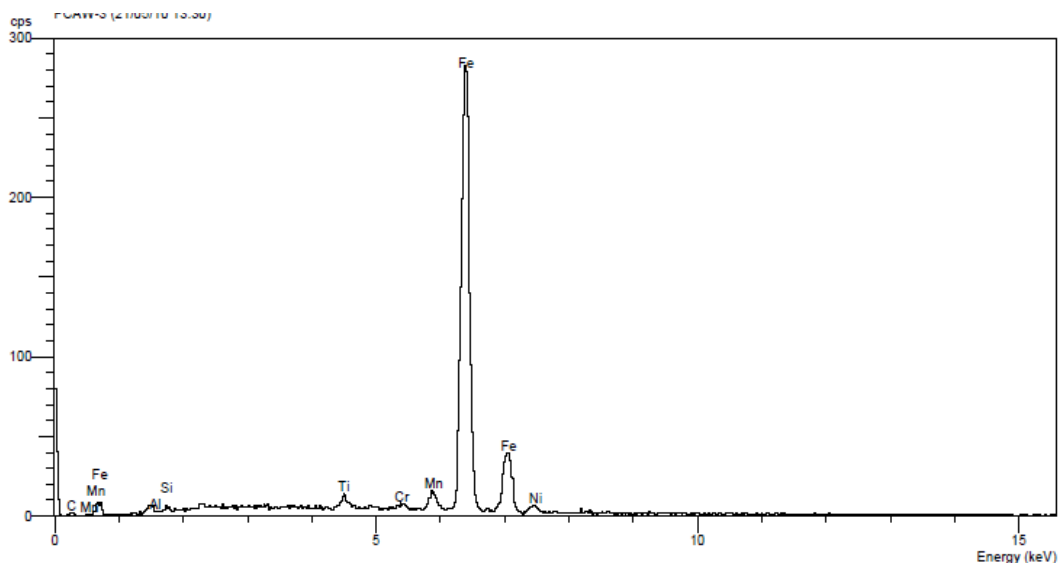
รูปที่ 3.8 โครงสร้างจุลภาคของ เฟสภายในเนื้อเชื่อม ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก (MIG/MAG)



รูปที่ 3.9 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน เฟสภายในเนื้อเชื่อม ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก (MIG/MAG)



รูปที่ 3.10 โครงสร้างจุลภาคของ เฟสภายในเนื้อเชื่อม ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW)



รูปที่ 3.11 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน เฟสภายในเนื้อเชื่อม ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์

จากรูปที่ 3.6 3.8 และ 3.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่มี เฟสภายในเนื้อเชื่อม (inclusion) ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 3.7 3.9 และ 3.11 แสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน เฟสภายในเนื้อเชื่อม ในเนื้อเชื่อมบริเวณในรูปที่ 3.6 3.8 และ 3.10 ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ ตามลำดับ พบว่าธาตุที่เป็นองค์ประกอบของ เฟสภายในเนื้อเชื่อม ในเนื้อเชื่อมจะเป็นแมงกานีส แต่ที่พบธาตุชนิดอื่นด้วยเนื่องจาก เฟสภายในเนื้อเชื่อม มีขนาดเล็กมาก เมื่อทดสอบด้วยเครื่อง EDX จะยังไปโดนบริเวณรอบข้างของ เฟสภายในเนื้อเชื่อม ซึ่งเป็นเนื้อเชื่อม

3.3 ผลการตรวจสอบด้วยการถ่ายภาพรังสี

เนื่องจากจำนวนชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าที่ทดสอบแต่ละค่าความเค้นใช้เพียงแค่ 2 ชิ้น แต่ตามคำแนะนำตามมาตรฐาน ASTM E 739-91 ใช้ชิ้นทดสอบแต่ละค่าความเค้นใช้ 6 ชิ้น ดังนั้นก่อนทดสอบจึงต้องนำไป ตรวจสอบด้วยการถ่ายภาพรังสี โดยใช้รังสี Gamma เพื่อให้ได้ชิ้นทดสอบ ที่สมบูรณ์ไม่มีจุดพร่องในการทดสอบความแข็งแรงล้า ซึ่งจุดบกพร่องต่าง ๆ ในชิ้น

ทดสอบอาจจะส่งผลต่อค่าความแข็งแรงถ้า ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.2 รูปที่ถ่ายภาพรังสีที่ทดสอบขึ้นทดสอบความแข็งแรงถ้า แสดงในรูปที่ 3.6-3.13

ตารางที่ 3.2 ผลการตรวจสอบด้วยการถ่ายภาพรังสี

ชั้นที่	Interpretation		
	MMA	MAG	FCAW
1	No visual defect	No visual defect	Minor Porosity
2	No visual defect	No visual defect	No visual defect
3	Lack of Fusion/ Crack/Porosity	No visual defect	Minor Slag เฟส ภายในเนื้อเชื่อม
4	Minor Porosity	No visual defect	Crack
5	No visual defect	No visual defect	No visual defect
6	No visual defect	Cluster Porosity	No visual defect
7		Minor Slag เฟสภายใน เนื้อเชื่อม	No visual defect
8		Minor Porosity	No visual defect



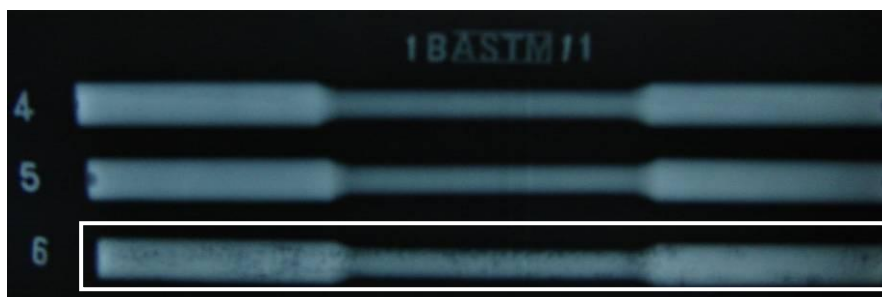
รูปที่ 3.12 फिल्मถ่ายภาพขึ้นทดสอบความแข็งแรงถ้าจากเนื้อเชื่อม MMA ชั้นที่ 1-3



รูปที่ 3.13 फिल्मถ่ายภาพขั้นตอนทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MMA ชั้นที่ 4-6



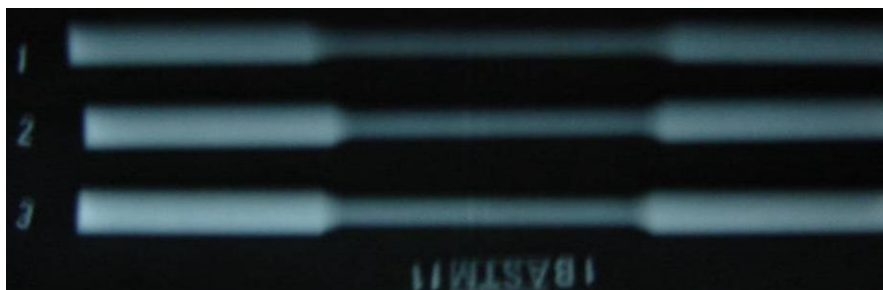
รูปที่ 3.14 फिल्मถ่ายภาพขั้นตอนทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ชั้นที่ 1-3



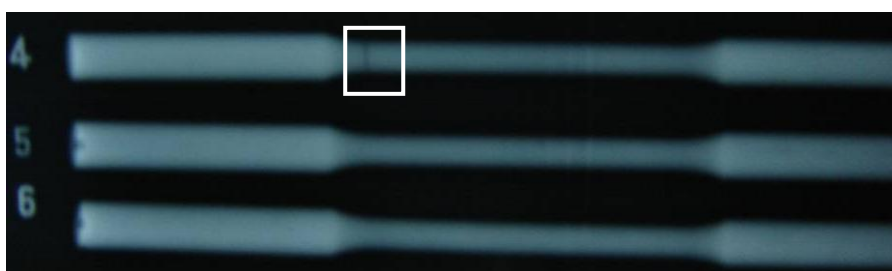
รูปที่ 3.15 फिल्मถ่ายภาพขั้นตอนทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ชั้นที่ 4-6



รูปที่ 3.16 फिल्मถ่ายภาพขั้นตอนทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ชั้นที่ 7-8



รูปที่ 3.17 फिल्मถ่ายภาพชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม FCAW ชั้นที่ 1-3



รูปที่ 3.18 फिल्मถ่ายภาพชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม FCAW ชั้นที่ 4-6



รูปที่ 3.19 फिल्मถ่ายภาพชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม FCAW ชั้นที่ 7-8

จากตารางที่ 3.2 ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชั้นที่ 3 มีรอยแตกใกล้บริเวณเปลี่ยนโค้ง และชั้นที่ 4 มีรูพรุนขนาดเล็ก ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมมิก/แมกซ์ชั้นที่ 6 และชั้นที่ 8 มีรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งชั้นที่ 6 รูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากอย่างเห็นได้ชัดเจน ส่วนชั้นที่ 7 มีสแลก (Slag) อยู่ในชั้นทดสอบ ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้าที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ชั้นที่ 1 มีรูพรุนขนาดเล็ก ชั้นที่ 3 มีสแลก (Slag inclusion) อยู่ในชั้นทดสอบ และชั้นที่ 4 มีรอยแตก ซึ่งจากรูปที่ 3.12–3.19 บริเวณที่มีความแตกต่างของภาพถ่ายรังสีเป็นความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นในชั้นทดสอบ ชั้นทดสอบที่

มีความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงานที่มีขนาดเล็กมากจะไม่สามารถมองเห็นในภาพ แต่จะมองเห็นเมื่อนำฟิล์มถ่ายภาพไปดูในห้องมืด ชิ้นทดสอบที่มีความไม่ต่อเนื่องทั้งหมดจะไม่นำมาทดสอบความแข็งแรงต่ำ เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องเหล่านี้้อาจจะส่งผลถึงค่าความแข็งแรงต่ำของเนื้อเชื่อม ทำให้จำนวนรอบที่ทดสอบความแข็งแรงต่ำน้อยกว่าชิ้นทดสอบที่มีความสมบูรณ์

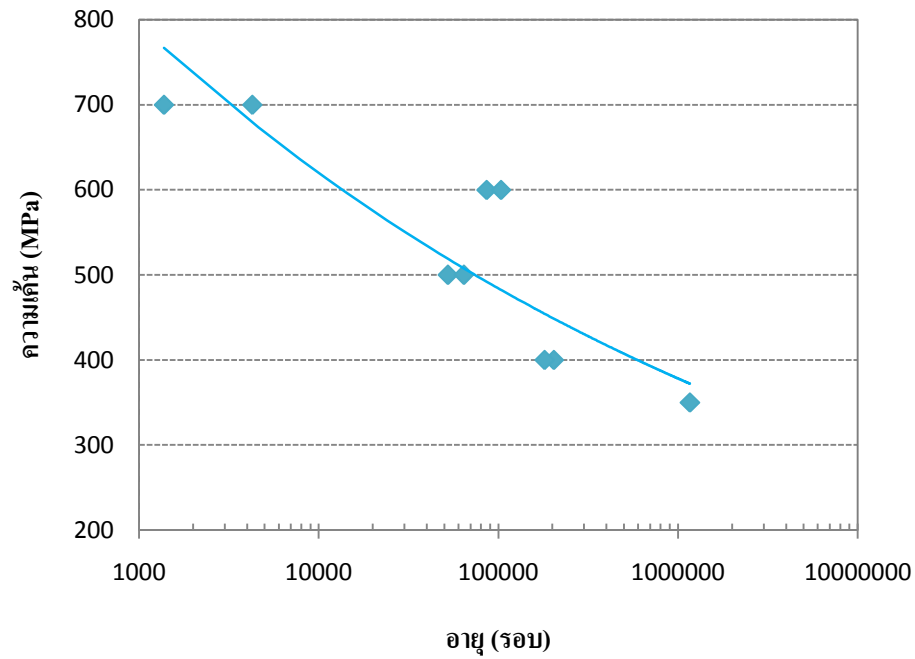
3.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงต่ำ

ผลการทดสอบความแข็งแรงต่ำชิ้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมกรเชื่อมมิก/แมก กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ และเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 แสดงในตารางที่ 3.3 และนำผลการทดสอบมาเขียนกราฟกึ่งลอการิทึม (Semi-logarithmic) โดยให้แกนนอนเป็นลอการิทึม แสดงในรูปที่ 3.20-3.24

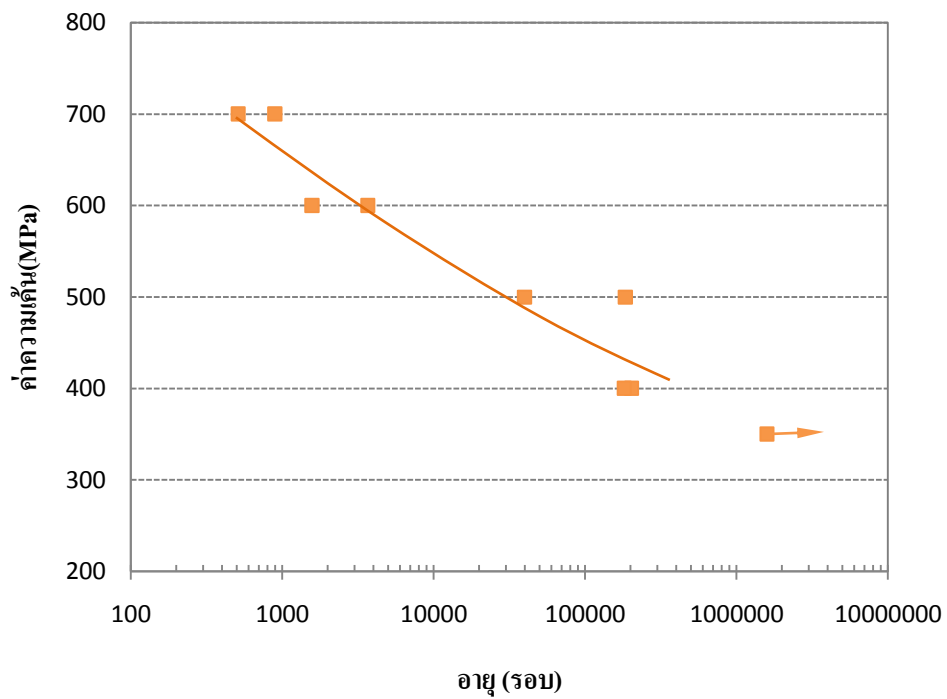
ตารางที่ 3.3 ค่าความเค้นกับจำนวนรอบที่เกิดความเสียหาย

ความเค้น (MPa) (ครั้งที่)	อายุ (รอบ)			
	MMA	MIG/MAG	FCAW	Base Metal
300	-	-	6713160*	-
350	1166063	1582570*	1467630*	-
400 (1)	203481	202039	804931	435609
400 (2)	180793	180793	815756	746380
500 (1)	52474	39854	105401	87690
500 (2)	64230	184415	47150	107616
600 (1)	86168	3663	216760	85546
600 (2)	103394	1574	49008	-
700 (1)	4270	510	51210	13025
700 (2)	1377	895	15763	15763
800	-	-	1710	11831

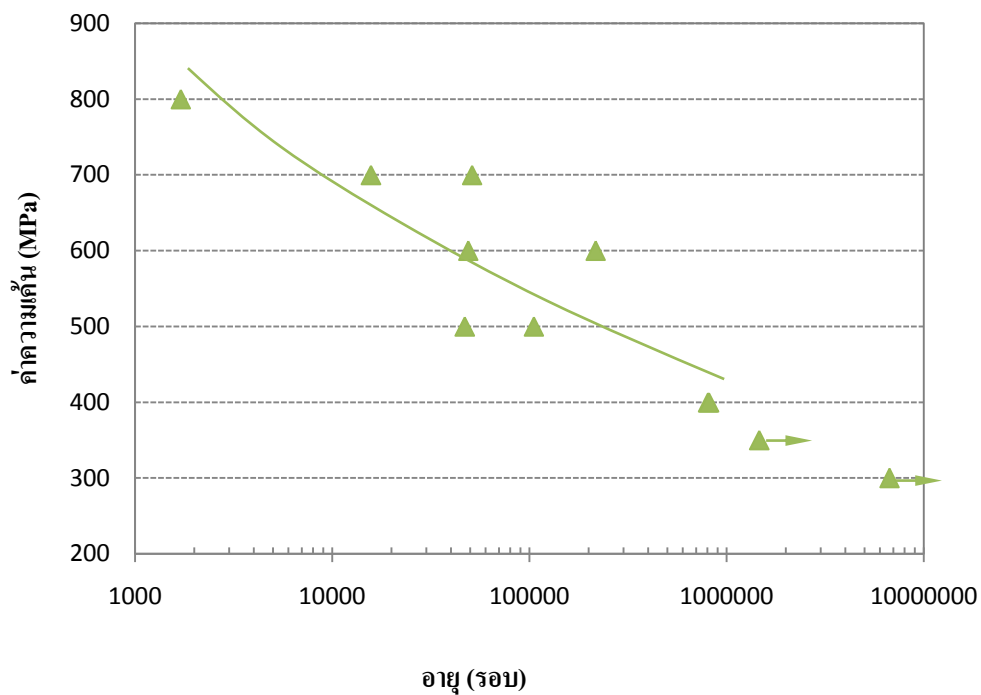
*หยุดการทดสอบที่จำนวนรอบนั้น โดยที่ชิ้นงานยังไม่ขาด



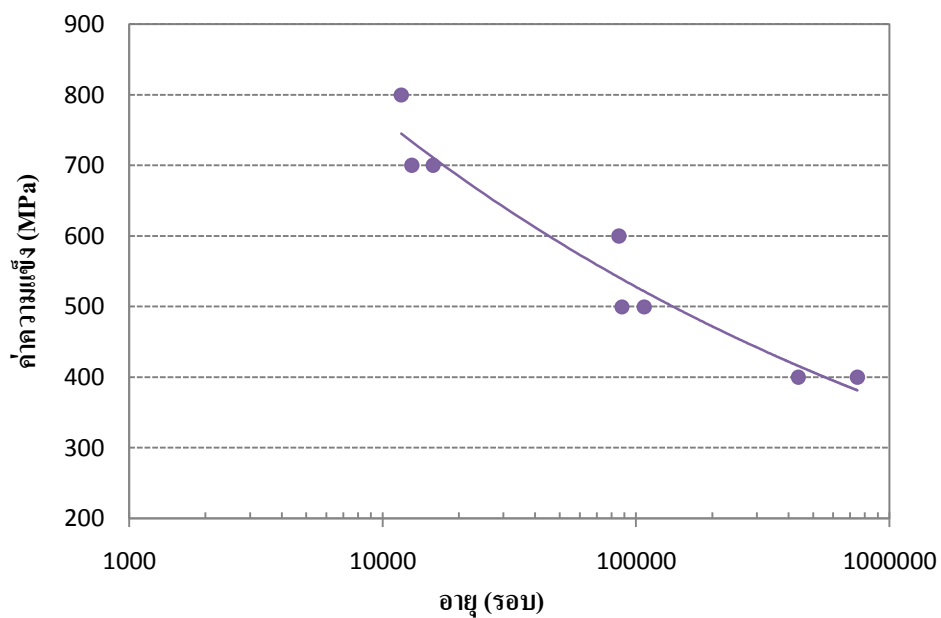
รูปที่ 3.20 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้า AISI 4340 ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (MMA)



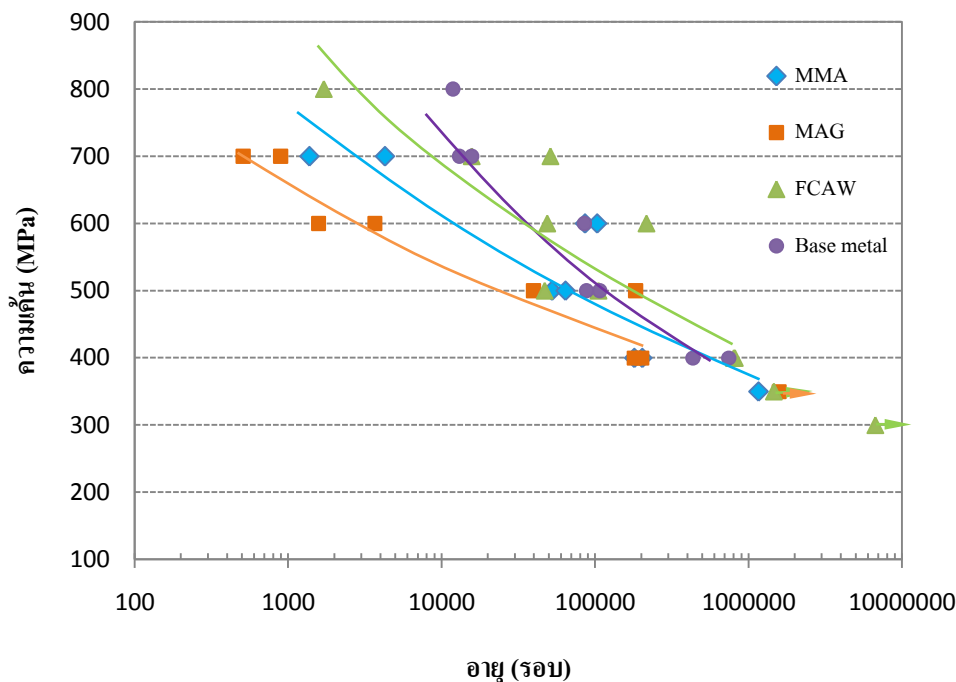
รูปที่ 3.21 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้า AISI 4340 ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก



รูปที่ 3.22 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้า AISI 4340 ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FACW)



รูปที่ 3.23 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับอายุของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 (Base metal)



รูปที่ 3.24 กราฟเปรียบเทียบความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมที่ได้จากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมไส้ฟลักซ์ และเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340

จากรูปที่ 3.24 เมื่อวิเคราะห์จะได้อายุ ดังนี้

- ที่ภาระ 700 MPa ชั้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อม ไส้ฟลักซ์จะมีอายุสูงสุด โดยที่ชั้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อม หุ้มฟลักซ์และเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อมมิก/แมกมีอายุลดลงตามลำดับ แต่เมื่อเทียบกับชั้นทดสอบที่เตรียมจากโลหะเดิม คือ เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 มีอายุสูงกว่าเนื้อเชื่อมทั้งสามกรรมวิธีการเชื่อม โดยที่ชั้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมของลวดเชื่อม ไส้ฟลักซ์ เนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อม หุ้มฟลักซ์และเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อมมิก/แมกมีอายุลดลงตามลำดับ

- ที่ภาระ 600 MPa ชั้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อม ไส้ฟลักซ์จะมีอายุสูงสุด โดยที่ชั้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อม หุ้มฟลักซ์และเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อมมิก/แมกมีอายุลดลงตามลำดับ แต่เมื่อเทียบกับชั้นทดสอบที่เตรียมจากโลหะเดิม คือ เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 มีอายุสูงกว่าเนื้อเชื่อมของลวดเชื่อมทั้งสามกรรมวิธีเชื่อมเช่นกัน โดยที่ชั้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อม ไส้ฟลักซ์ เนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อม หุ้มฟลักซ์และเนื้อเชื่อมของลวดเชื่อมมิก/แมกมีอายุลดลงตามลำดับ

- ที่ภาระ 500 MPa ชี้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อม ใส่ฟลักซ์จะมีอายุสูงสุด โดยที่ชี้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อม หุ้มฟลักซ์และเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อม มิก/แมกมีอายุเกือบจะเท่ากัน เมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิม พบว่าชี้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมของลวดเชื่อม ใส่ฟลักซ์จะมีจำนวนรอบสูงกว่าเนื้อโลหะเดิมเล็กน้อย ตามด้วยชี้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อมลวดเชื่อม หุ้มฟลักซ์และเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อม มิก/แมกซึ่งใกล้เคียงกัน

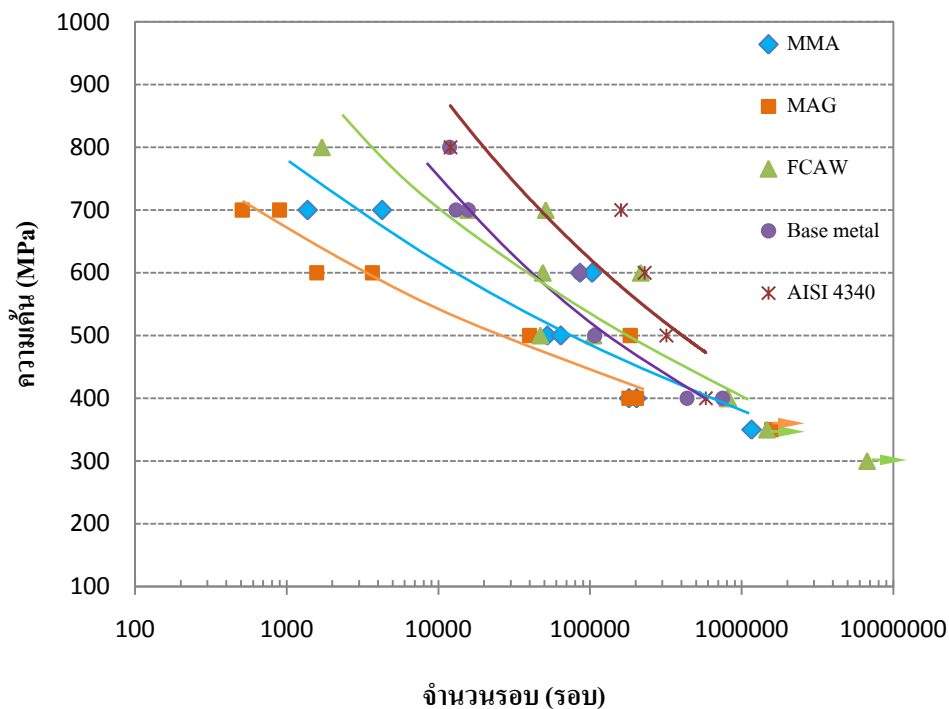
- ที่ภาระ 400 MPa ชี้นทดสอบซึ่งเตรียมจากเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อมของลวดเชื่อม ใส่ฟลักซ์จะมีจำนวนรอบสูงสุด โดยที่ชี้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อมเนื้อเชื่อมของลวดเชื่อม มิก/แมกจำนวนรอบเท่า ๆ กัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิม พบว่าชี้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อม ใส่ฟลักซ์จะมีจำนวนรอบสูงสุด ตามมาด้วยเนื้อโลหะเดิม และทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และเนื้อเชื่อมของลวดเชื่อมมิก/แมก

- ที่ภาระ 350 MPa ชี้นทดสอบซึ่งเตรียมจากเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อม มิก/แมกและเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อม ใส่ฟลักซ์ทดสอบสูงเกิน 1,000,000 รอบ ชี้นทดสอบไม่ขาดจึงหยุดการทดสอบ ส่วนชี้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อมของลวดเชื่อม หุ้มฟลักซ์มีอายุ 1,166,063 รอบ

- ที่ภาระ 300 MPa ชี้นทดสอบซึ่งเตรียมจากเนื้อเชื่อม ของลวดเชื่อม ใส่ฟลักซ์มีจำนวนรอบสูงถึง 6,713,160 รอบ ชี้นทดสอบยังไม่ขาดจึงหยุดทดสอบ ดังนั้นชี้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และเนื้อเชื่อมของลวดเชื่อมมิก/แมกจึงไม่ทดสอบที่ภาระนี้

จากรูปที่ 3.25 การทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงล้าของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ต่ำกว่าเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ที่มาจากการทดลองของ G. Magudeeswaran et al มีสาเหตุมาจากในขณะที่เตรียมชี้นทดสอบความแข็งแรงล้าของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ในบริเวณจุดเปลี่ยนโค้งของชี้นทดสอบมีความผิดพลาดเกิดขึ้นทำให้ชี้นทดสอบขาดบริเวณนั้น (แสดงในภาคผนวก ง) ทำให้ค่าที่ทดสอบมีความผิดพลาดเล็กน้อย

การที่ชี้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมทั้งสามกรรมวิธีการเชื่อมนั้นมีอายุน้อยกว่าชี้นทดสอบที่เตรียมจากเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 เนื่องจากเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคืนตัว มีค่าความแข็งในช่วง 300-340 HV ซึ่งเป็นค่าความแข็งที่สูงกว่าเนื้อเชื่อมทั้งสามกรรมวิธีการเชื่อม



รูปที่ 3.25 กราฟเปรียบเทียบความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมที่ได้จากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมไส้ฟลักซ์ เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 และเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ที่มาจากการทดลองของ G. Magudeeswaran et al

ความสัมพันธ์คดรอยเชิงเส้นของชั้นงานทดสอบความแข็งแรงล้าของชั้นงานทดสอบที่ทำจากเนื้อเชื่อมกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ โดยพิจารณาจากข้อมูลในตารางที่ 3.3 และนำไปวิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งแสดงได้ตามสมการ

$$N_f = 10^{(\sigma-c)/b} \tag{3.1}$$

เมื่อ N_f คือ อายุความล้าของชั้นทดสอบ
 σ คือ ความเค้น (MPa)
 c และ b คือ ค่าคงที่

ตารางที่ 3.6 ค่าคงที่ b และ c

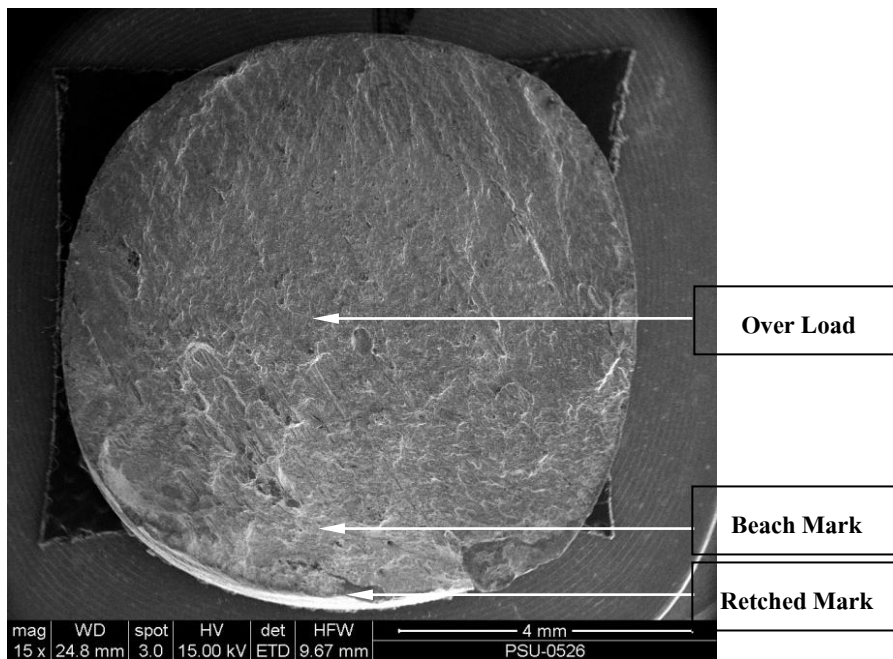
ชนิดทดสอบ	b	c
MMA	-0.10	1667
MAG	-0.05	1165
FCAW	-0.41	1954
Base metal	-0.16	3386

G. Magudeeswaran et al กล่าวว่าโครงสร้างจุลภาค Acicular ferrite เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง (Strength) และค่าความเหนียว (Toughness) ดี ยังมีค่าความเหนียวดีที่สุดเมื่อเทียบกับโครงสร้าง Polygonal ferrite, Widmanstatten ferrite หรือเบนไนต์ โครงสร้าง Acicular ferrite เกิดขึ้นภายในเกรนออสเทนไนต์ ซึ่งเกิดขึ้นโดยตรงจาก เฟสภายในเนื้อเชื่อม เช่น oxide เฟสภายในเนื้อเชื่อม ส่งผลให้เฟอร์ไรต์มีลักษณะเป็นรูปที่เข็มมีทิศทางอย่างไร้แบบแผน ซึ่งประกอบด้วยรูปร่างที่สานกันเหมือนกับตะกร้า อย่างไรก็ตามขนาดเกรนละเอียดส่งผลให้เกิดการต้านทานรอยแตกสูงสุด โครงสร้าง Acicular ferrite มีลักษณะเป็นขอบเกรนมุมสูงระหว่างเกรนเฟอร์ไรต์จะช่วยลดโอกาสการเกิด cleavage เพราะว่าขอบเกรนเหล่านี้ยังไปขัดขวางการพัฒนารอยแตกด้วย

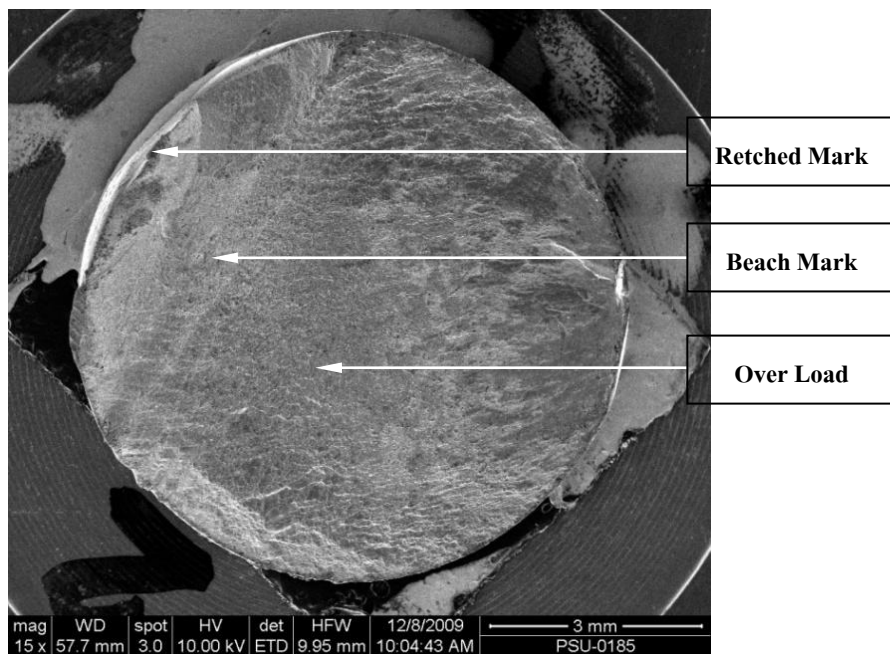
จากรูปที่ 3.5 ปริมาณโครงสร้าง Acicular ferrite ในเนื้อเชื่อมทั้งสามกรรมวิธีมีปริมาณสูงกว่าโครงสร้างจุลภาคชนิดอื่น ๆ ซึ่งโครงสร้าง Acicular ferrite เป็นโครงสร้างที่ต้องการในเนื้อเชื่อม ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงล้าของเนื้อเชื่อมทั้งสามกรรมวิธีด้วย ทำให้ค่าความแข็งแรงล้าของเนื้อเชื่อมของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สูงที่สุด โดยที่เนื้อเชื่อมของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และเนื้อเชื่อมของลวดเชื่อมมิก/แมกลดลงตามลำดับที่ค่าความเค้นที่ทดสอบ

3.5 ผลการวิเคราะห์หน้าตัดขึ้นทดสอบความแข็งแรงล้า

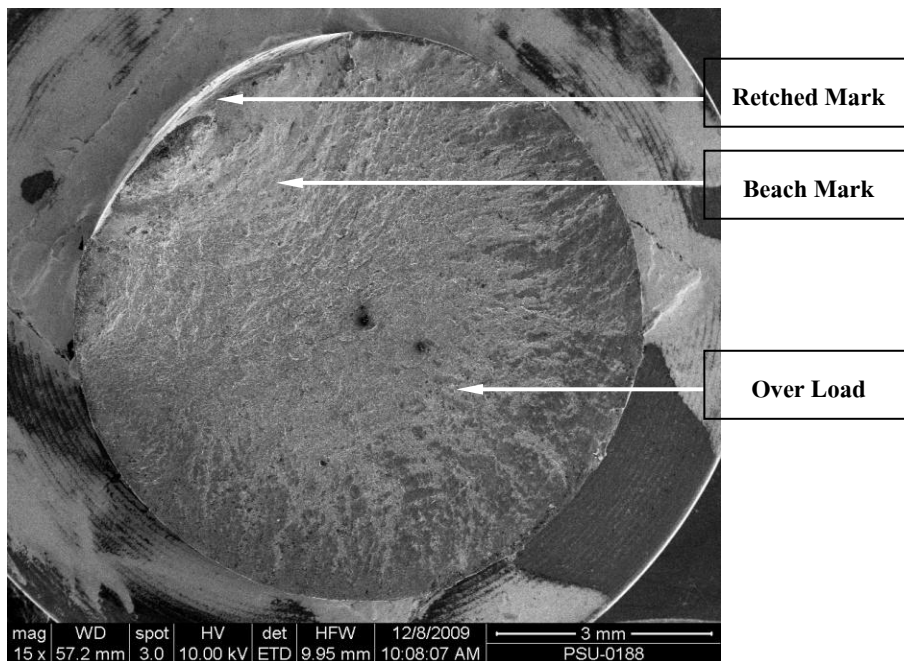
ผิวรอยแตกของขึ้นทดสอบความแข็งแรงล้าที่เตรียมจากเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 เนื้อเชื่อมของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ เนื้อเชื่อมของลวดเชื่อมมิก/แมก และเนื้อเชื่อมของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ แสดงดังรูปที่ 3.26, 3.27, 3.28 และ 3.29 ตามลำดับ มีกำลังขยาย 15 เท่า



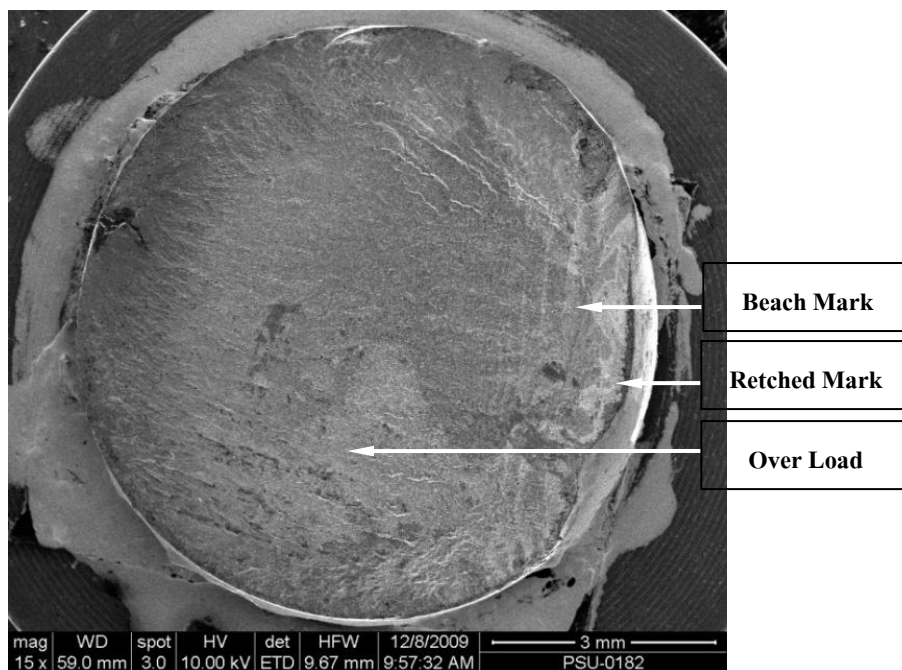
รูปที่ 3.26 ผิวยรอยแตกของชิ้นทดสอบความแข็งแรงด้าที่เตรียมจากเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ที่ความเค้น 400 MPa (15x)



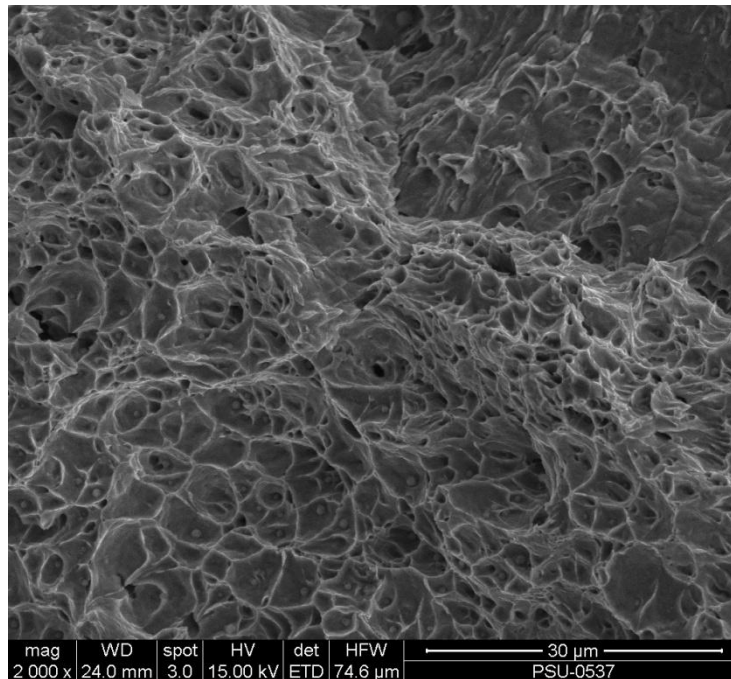
รูปที่ 3.27 ผิวยรอยแตกของชิ้นทดสอบความแข็งแรงด้าที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อม หุ้มฟลักซ์ ที่ความเค้น 400 MPa (15x)



รูปที่ 3.28 ฝัวรอยแตกของชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมมิก/แมก
ที่ความเค้น 400 MPa (15x)



รูปที่ 3.29 ฝัวรอยแตกของชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมไส้ฟลักซ์
ที่ความเค้น 400 MPa (15x)

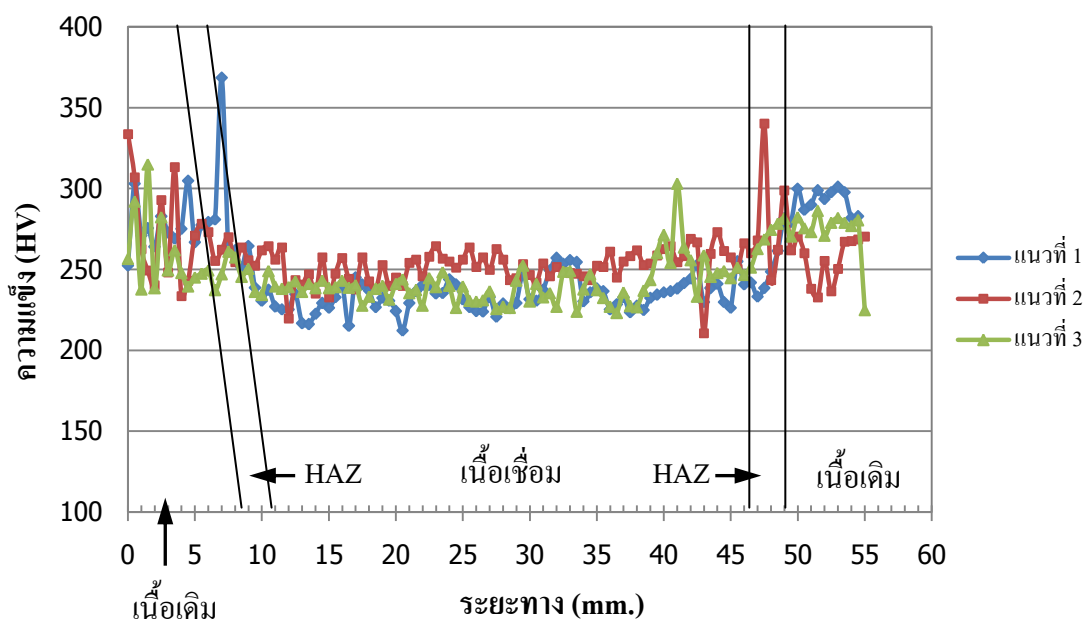


รูปที่ 3.30 โครงสร้างรอยนูน (dimple) บริเวณรอยแตก overload ของชิ้นทดสอบความแข็งแรง ล้ำที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมมิก/แมก (2000x)

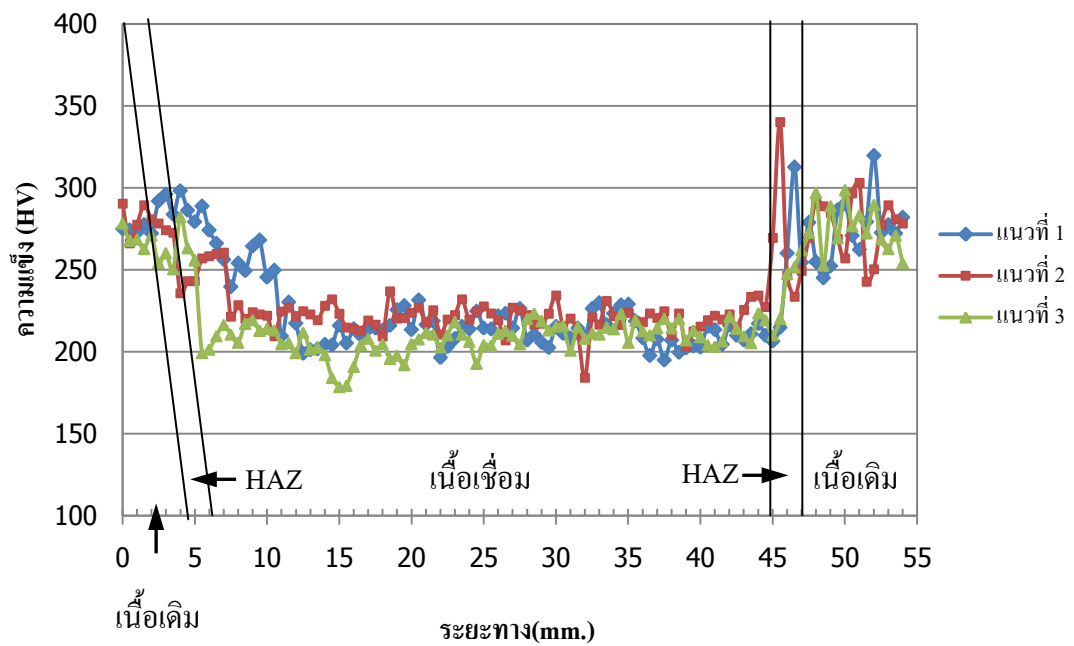
โดยปกติแล้วผิวหน้ารอยแตกเนื่องจากความแข็งแรงล้ำส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 3 บริเวณหลัก ๆ คือ บริเวณที่ 1 เป็นบริเวณจุดเริ่มรอยแตก (Crack initiation) ซึ่งจะพบ Retched mark บริเวณที่ 2 บริเวณขยายตัวรอยแตก (Crack Propagation) จะพบ Beach mark และบริเวณที่ 3 การแตกออกสุดท้าย (Final Rupture) ผิวหน้ารอยแตกของชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้ำที่เตรียมจาก เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 (รูปที่ 3.26) เนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อม หุ้มฟลักซ์ (รูปที่ 3.27) เนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก (รูปที่ 3.28) และเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไส้ฟลักซ์ (3.29) ประกอบไปด้วย 3 บริเวณ ตำแหน่งของแต่ละบริเวณ แสดงในรูปที่ข้างต้น ผิวหน้ารอยแตกของชิ้นงานทั้ง 4 ชิ้น เป็นรูปที่แบบการชำรุดแบบ Rotational bending ไม่มี Stress concentration ตามหัวข้อ 1.2.7.6 ซึ่งผิวหน้ารอยแตกมีการชำรุดแบบความล้ำ 15% ของพื้นที่หน้าตัดและการชำรุดแบบ Over load 85% ของพื้นที่หน้าตัด ส่วนบริเวณการแตก ออกสุดท้ายเป็นแบบ Over load เป็น High load และลักษณะการชำรุดแบบเหนียว (Ductile fracture) ซึ่งพบโครงสร้างรอยนูน ดังรูปที่ 3.30

3.6 ผลการทดสอบความแข็ง

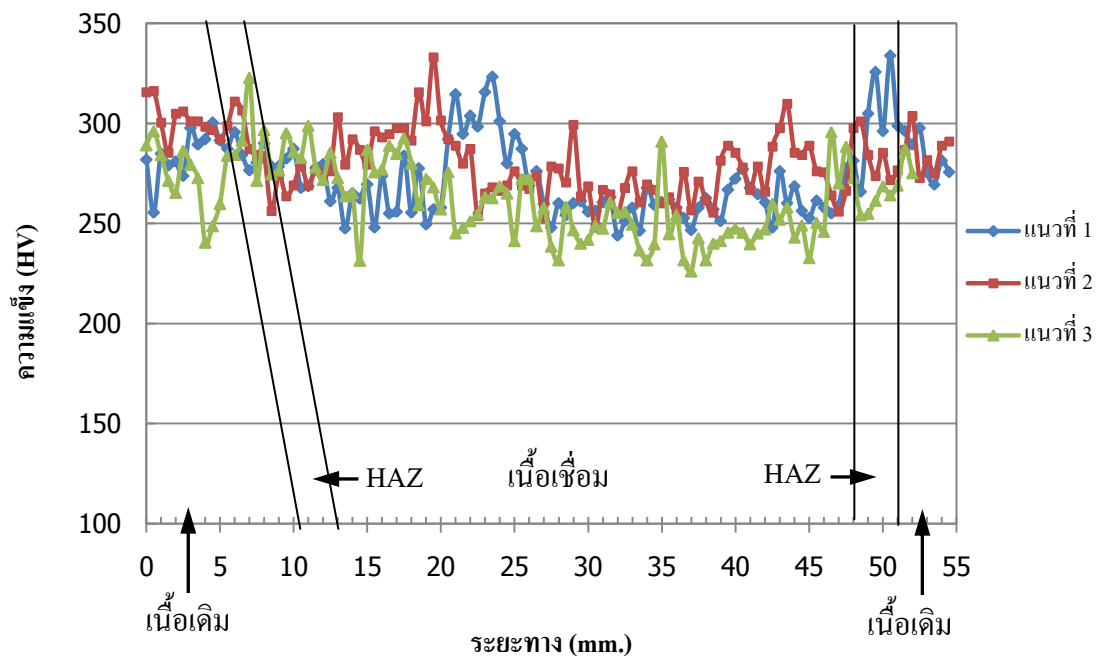
ผลจากความร้อนในกระบวนการเชื่อมทำให้บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนมีค่าความแข็งที่เปลี่ยนไปจากเนื้อโลหะเดิม (เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340) การทดสอบความแข็งจะเริ่มทดสอบจากเนื้อโลหะเดิม บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อม ผลการทดสอบค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมพอกหลายชั้นที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ ซึ่งผ่านการให้ความร้อนก่อนเชื่อม $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ และให้ความร้อนหลังเชื่อมที่ $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ นาน 1 ชั่วโมง แสดงในภาคผนวก ค ส่วนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งบริเวณต่าง ๆ กับระยะจุดที่ทดสอบ ดังรูปที่ 3.31, 3.32 และ 3.33 ตามลำดับ



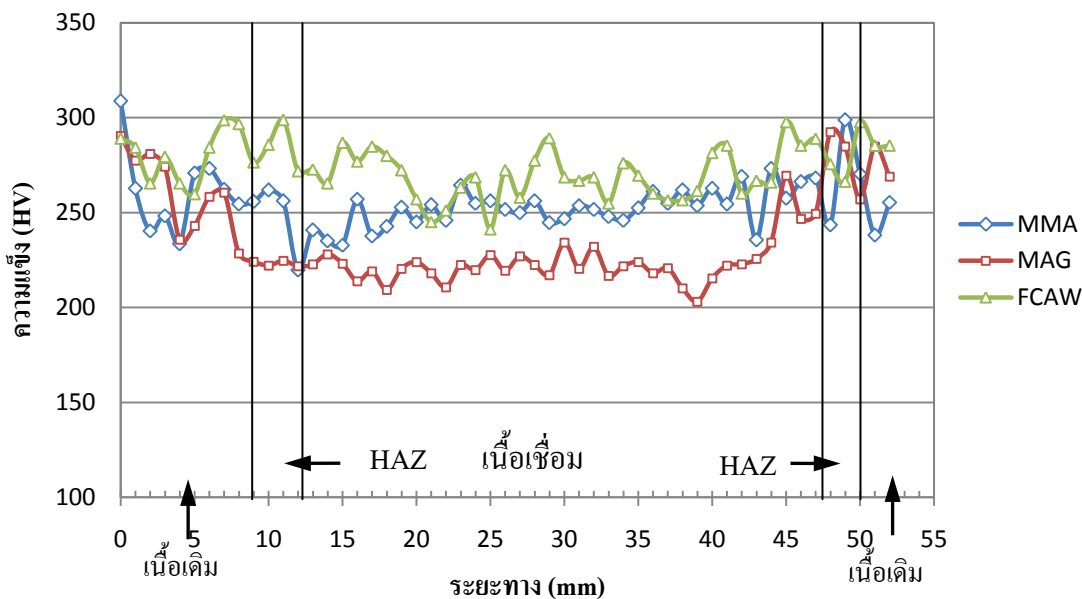
รูปที่ 3.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับระยะทางบริเวณเนื้อเดิม บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน และเนื้อเชื่อมหลายชั้นที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์



รูปที่ 3.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับระยะทางบริเวณเนื้อเดิม บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน และเนื้อเชื่อมหลายชั้นที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก



รูปที่ 3.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับระยะทางบริเวณเนื้อเดิม บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อมหลายชั้นที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์



รูปที่ 3.34 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งของกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมใส่ฟลักซ์

จากรูปที่ 3.31 ค่าความแข็งของบริเวณเนื้อเชื่อมพอกเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มีค่าความแข็งประมาณ 240 HV ส่วนค่าความแข็งบริเวณเนื้อเดิม (เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340) ประมาณ 275 HV และบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนมีค่าประมาณ 350 HV

จากรูปที่ 3.32 ค่าความแข็งของบริเวณเนื้อเชื่อมพอกเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก /แมกมีค่าความแข็งประมาณ 220 HV ส่วนค่าความแข็งบริเวณเนื้อเดิม ประมาณ 270 HV และบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนมีค่าประมาณ 340 HV

จากรูปที่ 3.33 ค่าความแข็งของบริเวณเนื้อเชื่อมพอกเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมใส่ฟลักซ์มีค่าความแข็งประมาณ 270 HV ส่วนค่าความแข็งบริเวณเนื้อเดิม ประมาณ 275 HV และบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนมีค่าประมาณ 340 HV

ค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมและเนื้อเดิมที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากค่าความแข็งแรงดึงของเนื้อเดิมสูงถึง 1044 MPa แต่ลวดเชื่อมทั้ง 3 ชนิดที่เลือกใช้นั้นมีค่าความแข็งแรงดึงประมาณ 770 MPa ส่งผลให้ค่าความแข็งที่ได้ของเนื้อเชื่อมทั้งสามกรรมวิธีการเชื่อมต่ำกว่าเนื้อเดิม ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งอีก คือ โครงสร้างจุลภาค และส่วนผสมทางเคมี

ค่าความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมหลายชั้นที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม ไร้ฟลักซ์มีค่าสูงสุด โดยที่เนื้อเชื่อมหลายชั้นที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และเนื้อเชื่อมหลายชั้นที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีมิก/แมกมีค่าลดลงตามลำดับ ซึ่งค่าความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมหลายชั้นที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อม ไร้ฟลักซ์นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าความแข็งของโครงสร้าง Acicular ferrite มากที่สุด โดย Shadeshia และ Svensson ได้ประเมินค่าความแข็งของโครงสร้าง Acicular ferrite ไว้ประมาณ 267 HV แสดงว่าเนื้อเชื่อมหลายชั้นที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม ไร้ฟลักซ์มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นโครงสร้าง Acicular ferrite ส่วนค่าความแข็งบริเวณเนื้อเดิม (เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340) ของทั้งสามกรรมวิธีการเชื่อมมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่าความแข็งบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนของทั้งสามกรรมวิธีการเชื่อมมีค่าสูงกว่าบริเวณเนื้อเชื่อม และบริเวณเนื้อเดิมมาก เนื่องมาจากบริเวณนี้ได้รับผลกระทบทางความร้อนในขณะที่เชื่อม ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น ซึ่งจากผลการทดสอบ โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนทั้งสามกรรมวิธีการเชื่อมเป็น โครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ และบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนของเนื้อเชื่อมหลายชั้นกว้างประมาณ 3 มิลลิเมตร เพราะว่าเป็นการเชื่อมหลายชั้นทำให้ความร้อนจากแนวเชื่อมชั้นถัดไปอบคืนตัวบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนชั้นก่อนหน้าบางส่วน ส่วน โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเดิม ทั้งสามกรรมวิธีการเชื่อมเป็น โครงสร้างเทมเปอร์เบนไนท์ โดยปกติแล้ว โครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์จะมีค่าความแข็งสูงกว่า โครงสร้างเทมเปอร์เบนไนท์ อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่าความแข็ง คือ ส่วนผสมทางเคมี ธาตุผสมที่มีบทบาทต่อการเพิ่มความแข็งให้กับ โครงสร้างเฟอร์ไรต์ค่อนข้างสูง คือ ซิลิกอน และ แมงกานีส ซึ่งจากตารางที่ 3.1 พบว่าปริมาณของซิลิกอนในเนื้อเชื่อมจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม ไร้ฟลักซ์มีปริมาณใกล้เคียงกัน จึงไม่ส่งผลให้ค่าความแข็งให้เนื้อเชื่อมทั้งสามกรรมวิธีแตกต่างกัน แต่ปริมาณแมงกานีสในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม ไร้ฟลักซ์มีค่าสูงกว่าเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก แมงกานีสจึงส่งผลให้ค่าความแข็งให้เนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม ไร้ฟลักซ์มีค่าสูงกว่ากรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และกรรมวิธีการเชื่อมมิก /แมก ดังนั้นเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม ไร้ฟลักซ์จะให้ค่าความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมใกล้เคียงกับบริเวณเนื้อเดิมมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาโครงสร้างจุลภาค ค่าความแข็ง และความแข็งแรงล้าของเนื้อเชื่อมหลายชั้นที่เชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมกและกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

4.1 สรุปผลการทดลอง

4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมทั้งสามกรรมวิธีการเชื่อมประกอบด้วยโครงสร้าง Acicular Ferrite Polygonal ferrite และ Side plate ferrite โดยมีปริมาณแตกต่างกัน ซึ่งโครงสร้าง Acicular ferrite มีปริมาณสูงสุดทั้งสามกรรมวิธีการเชื่อม และเป็นโครงสร้างที่ต้องการในเนื้อเชื่อมเนื่องจากมีค่าความแข็งแรงและความเหนียวดี โดยที่กรรมวิธีการเชื่อมไส้ฟลักซ์จะให้ปริมาณโครงสร้าง Acicular ferrite สูงกว่าอีกสองกรรมวิธีการเชื่อม

4.1.3 ค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์จะมีค่าใกล้เคียงกับเนื้อเดิมมากกว่าเนื้อเชื่อมที่เชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และเนื้อเชื่อมมิก /แมก ส่วนค่าความแข็งบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนทั้ง 3 กรรมวิธี มีค่าใกล้เคียงกับเนื้อเชื่อมและโลหะเดิม เนื่องจากมีการให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม อีกทั้งยังเป็นการเชื่อมหลายชั้นจึงทำให้แนวเชื่อมถูกอบคืนตัวด้วยแนวเชื่อมชั้นถัดไป และค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมที่ได้จากกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์มีค่าความแข็งใกล้เคียงกับโครงสร้าง Acicular ferrite มากที่สุด

4.1.4 ค่าความแข็งแรงล้าของเนื้อเชื่อมที่เตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมไส้ฟลักซ์มีค่าสูงกว่าเนื้อเชื่อมที่เตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และเนื้อเชื่อมที่เตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก แต่มีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงล้าของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ไม่มากนัก เนื่องจากเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์มีปริมาณ Acicular ferrite และค่าความแข็งสูงกว่าเนื้อเชื่อมที่เตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และเนื้อเชื่อมที่เตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก

4.1.5 การเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 เพื่อป้องกันการแตกหักจากความล้าได้ดีที่สุด คือ กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

4.2 ข้อเสนอแนะ

4.2.1 ในระหว่างการเชื่อมต้องควบคุมอุณหภูมิไม่ให้ต่ำกว่า 350 °C เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์

4.2.2 ในการเชื่อมซ่อมไม่ควรเชื่อมชั้นเดียว เนื่องจากบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนมีค่าความแข็งสูง มีความเปราะง่ายต่อการแตกร้าว ควรจะเชื่อมอย่างน้อย 2 ชั้น เพื่อให้ความร้อนของการเชื่อมในชั้นที่ 2 อบอุ่นตัวบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในชั้นที่ 1

4.2.3 หลังการเชื่อมซ่อมเสร็จต้องตรวจสอบว่ามีรอยร้าวเกิดขึ้นหรือไม่ โดยวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย หากมีรอยร้าวเกิดขึ้นต้องทำการซ่อมทันที

4.2.4 ขึ้นทดสอบที่ใช้ทดสอบความแข็งแรงล้ามีจำนวนชิ้นงานที่น้อย เพื่อให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ควรจะเพิ่มชิ้นทดสอบ

- [1] ณรงค์ฤทธิ์ โทษรัตน์., “การศึกษาพฤติกรรมการล้าและการแตกหักบริเวณผลกระทบจากความร้อนของเหล็ก เกรด AISI 4340 เพื่อปรับปรุงกรรมวิธีการเชื่อมซ่อม. ” เชียงใหม่ : วิทยาลัยพณิชยการหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2545.
- [2] เชิดเชลง ชิตชวนกิจ, ขงยุทธ เสริมสุขธีอนุวัฒน์ และอัครกร กลั่นความดี ., “Welding and Joining Engineering.” กทม.: บริษัท ดวงกมล จำกัด, 2524.
- [3] K. Weman, 2003. Welding processes handbook. Woo England,
- [4] Raymond H.. “Shielded Metal Arc Welding” in Welding, Brazing and Soldering, ASM Hand book, vol.6, ASM International, OH, 1993, pp. 558-559.
- [5] Kou S., “Gas-Metal Arc Welding” in Welding Metallurgy, 2nd ed., Wiley, New York, 2003, pp.19-22.
- [6] Kou S., “Flux-Core Arc Welding” in Welding Metallurgy, 2nd ed., Wiley, New York, 2003, pp.22-23.
- [7] Kou S., “Transformation-Harding Materials: Carbon and Alloy Steel” in Welding Metallurgy, 2nd ed., Wiley, New York, 2003, pp.393-394.
- [8] จิตติ บัวพูน, นิรมิต เดชสุภา, ประศาสน์ สุบรรพวงษ์ และณรงค์ฤทธิ์ โทษรัตน์. การวิเคราะห์ การชำรุดเบื้องต้น. สงขลา : ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2550.
- [9] Liu S., “Weldability of Steels: Characteristic Features of Welds,” in Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloy, ASM Hand book, vol.1, ASM International, OH, 1993, pp. 1408-1410.
- [10] Kou S., “Austenite to ferrite transformation in low-carbon, low-alloy steel welds” in Welding Metallurgy, 2nd ed., Wiley, New York, 2003, pp.232-239.
- [11] P. Ravi Vishnu, “Solid-State Transformations in Weldments” in Welding and Brazing and Soldering, ASM Hand book, vol.6, ASM International, OH, 1993, pp.191-204.

- [12] Kou S., “Solidification Modes” in *Welding Metallurgy*, 2nd ed., Wiley, New York, 2003, pp.199-200.
- [13] Kou S., “Phase diagram and CCT Diagrams” in *Welding Metallurgy*, 2nd ed., Wiley, New York, 2003, pp.393-396.
- [14] Liu S., “Weldability of Steels: Characteristic Features of Welds,” in *Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloy*, ASM Hand book, vol.1, ASM International, OH, 1993, pp. 1408-1410.
- [15] P. Ravi Vishnu, “Solid-State Transformations in Weldments” in *Welding and Brazing and Soldering*, ASM Hand book, vol.6, ASM International, OH, 1993, pp.206-209.
- [16] จิตติ บัวพูน, นิรมิต เศษสุภา, ประศาสน์ สุบรรพวงษ์ และณรงก์ฤทธิ์ โทชรรัตน์. , “การวิเคราะห์การชำรุดเบื้องต้น ” สงขลา : ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2550.
- [17] <http://highered.mcgraw-hill.com/sites/dl/free/0073121932/365766/chapter6.pdf> สืบค้นเมื่อวันที่ 8/01/53
- [18] ศุภชัย ตระกูลทรัพย์ทวี. , การออกแบบเครื่องกลและชิ้นส่วนเครื่องจักร 1. กทม.: บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด(มหาชน), 2547.
- [19] George F. Vander Voort, “*Fatigue Fractures: Visual Examination and Light Microscopy*,” in *Fractography*, ASM Hand book, vol.12, ASM International, OH, 1993, pp. 215-236.
- [20] จิตติ บัวพูน., “โลหะวิทยาในชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ” แผนกฝึกอบรมวิชาการและเทคโนโลยี , กองฝึกอบรมแม่มาะ, ฝ่ายพัฒนาบุคลากร, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2547.
- [21] Woei-Shyan Lee, and Tzay-Tiay Su. “Improvement of metallurgical and Mechanical properties of welding surfacing on high strength steel AISI 4340 by Various preheating temperatures.” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 87, pp. 198-206, 1997.

- [22] G. Magudeeswaran, V. Balasubramanian, and G. Madhusudhan Reddy. "Effect of welding processes and consumables on high cycle fatigue life of high strength quenched and tempered steel joints." *Materials and Design*, Vol. 29, pp.1821-1827, 2008.
- [23] D.P. Fairchild, N.V. Bangaru, J.Y. Koo, P.L. Harrison and A. Ozekin,. "A study concerning Inter-critical HAZ Microstructure and Toughness in HSLA Steels." *Journal of Welding Research*, American Welding Society, pp. 312s-329s
- [24] P. Ravi Vishnu, "Solid-State Transformations in Weldments" in *Welding and Brazing and Soldering*, ASM Hand book, vol.6, ASM International, OH, 1993, pp.191-204.
- [25] V. B. da Trindade Filho, A.S. Guimaraes, J. da C. Payao Filho and R. P. da R. Paranhos. "Normalizing heat treatment effect on low alloy steel weld metals." in *COBEF 2003 – II Brazilian Manufacturing Congress*, pp.62-66, 2003.
- [26] J.C.F. Jorge, L.F.G. Souza, and J.M.A. Rebello. "The effect of chromium on the microstructure/toughness relationship of C–Mn weld metal deposits." *Materials Characterization*, vol. 47, pp.195-205, 2001.
- [27] C.H. Lee, H.K.D.H. Bhadeshia, and H.-C. Lee. 2003. Effect of plastic deformation on the formation of acicular ferrite. *Materials Science and Engineering A360*: 249-257.
- [28] Sudarsanam Suresh Babu. "The mechanism of acicular ferrite in weld deposits." *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol.8, pp.267-278, 2004.
- [29] T. Pan, Z.-G. Yang, C. Zhang, B.-Z. Bai and H.-S. Fang. "Kinetics and mechanisms of intragranular ferrite nucleation on non-metallic inclusions in low carbon steels." *Materials Science and Engineering*, Vol. 438-440, pp. 249-257, 2006.
- [30] W.W. Bose-Filho, A.L.M. Carvalho, and M. Strangwood. "Effects of alloying elements on the microstructure and inclusion formation in HSLA multipass welds." *Materials Characterization*, Vol.58 pp.29-39, 2007.
- [31] De-liang Ren, Fu-ren Xiao, Peng Tian, Xu Wang, and Bo Liao. "Effects of welding wire composition and welding process on the weld metal toughness of submerged arc

- welded pipeline steel.” *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 16, pp.65-70, 2009.
- [32] M.H. Avazkonandeh-Gharavol, M. Haddad-Sabzevar, and A.Haerian. “Effect of copper content on the microstructure and mechanical properties of multipass MMA, low alloy steel weld metal deposits.” *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 1902-1912, 2008.
- [33] S. Mukhopadhyay and T.K. Pal. “Effect of shielding gas metal arc weld arc welding of HSLA steel using solid and flux-cored wires.” *Int J Manuf Technol*, Vol. 29 pp. 262-268, 2006.
- [34] J. Onoro. “Weld metal microstructure analysis of 9–12% Cr steels.” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 83, pp.540-545, 2006.
- [35] J. Onoro. “Martensite microstructure analysis of 9–12% Cr steels.” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.180, pp. 137-142, 2006.
- [36] ณรงค์ฤทธิ์ โทรรัตน์ และ ตะวัน สุจริตกุล . “อิทธิพลการให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อมบริเวณผลกระทบจากความร้อนต่ออัตราการขยายตัวของรอยแตกจากความล้าของเหล็กเกรด เอไอเอสไอ 4340.” *การประชุมวิชาการเครื่องช่วยวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17*, 2546.
- [37] P.Muangjumburee. “Improvement of Metallurgical and Mechanical Properties of Welding Surfacing on High Strength Steel AISI 4340 by Various Preheating Temperatures.” *International Conference on the Frontiers of Technology*, Phuket, Thailand, 2007.
- [38] P.Muangjumburee. “Improvement of metallurgical and Mechanical properties of welding surfacing on high strength steel AISI 4340 by Post-weld heat treatment.” *The First South-East Asia IIW Congress*, pp. 273-277, 2007.
- [39] Wei Wang, Yiyin Shan and Ke Yang. “Study of high strength pipeline steels with different microstructures.” *Materials Science and Engineering*, Vol. A 502, pp. 38-44, 2009.

- [40] I. Madariaga, I. Gutierrez, C. Garcia-de Andres and C. Capdevila. “Acicular ferrite formation in a medium carbon steel with a two stage continuous cooling.” *Scripta Materialia*, Vol. 41, pp. 229–235, 1999.
- [41] T. Lant, D. L. Robinson, B. Spafford and J. Storesund. “Review of weld repair procedures for low alloy steels designed to minimise the risk of future cracking.” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 78, pp. 813-818, 2001.
- [42] วีระ ประเสริฐ. กลศาสตร์แตกหัก. พิมพ์ครั้งที่ 1 สงขลา: ฝ่ายวิจัยและบริการทางวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2535.
- [43] บัญชา ชนบุญสมบัติ. พจนานุกรม ศัพท์วัสดุศาสตร์และเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 1 กทม.: ศูนย์เทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2547.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของลวดเชื่อม

เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 เป็นเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูง ดังนั้นการเลือก
ลวดเชื่อมต้องพิจารณาค่าความแข็งแรงจึงเป็นหลัก และความผสมทางเคมีต้องอยู่ในกลุ่มเดียวกัน
คือ กลุ่มเหล็กกล้าผสมต่ำ สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกลวดเชื่อม ดังนี้

ก. **1 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์** เลือกใช้ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS A5.5-96 E11018-G H 4R (EN 757-1997 E696Mn2NiCrMoB42H5) ซึ่งเป็นลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับเหล็กกล้า
Quenched และ Tempered ความแข็งแรงดึงสูงถึง 880 N/mm² โดยมีคุณสมบัติ ดังนี้

ตารางที่ ก 1 ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E11018-G H 4R

ธาตุผสม (Alloying elements)	เปอร์เซ็นต์ (%)
C	0.05
Mn	1.50
Si	0.40
Mo	0.50
Ni	2.00
Cr	0.40

ตารางที่ ก 2 คุณสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E11018-G H 4R

คุณสมบัติเชิงกล	หมายเหตุ
ความแข็งแรงดึง (MPa)	840
ความแข็งแรงคราก (MPa)	780
อัตราการยืดตัว (%)	20
ความแข็งแรงกระแทก (Charpy) (J)	110 ที่ -60 °C
ปริมาณการแพร่ไฮโดรเจนในเนื้อเชื่อม	<5 ml/100g

ที่มา: Welding Guide

Bohler Welding Technology

Bohler Schweißtechnik Austria GMBH

ก.2 ลวดเชื่อมมิก/แมก เลือกใช้ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS A5.28-ER110S-G (EN 12534 Mn3NiCrMo) ลวดเชื่อมชนิดนี้เหมาะกับเหล็กกล้า Quenched และ Tempered โดยมีคุณสมบัติ ดังนี้

ตารางที่ ก 3 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม ER110S-G

ธาตุผสม (Alloying elements)	เปอร์เซ็นต์ (%)
C	0.08
Mn	1.40
Si	0.60
Mo	0.40
Ni	2.50
Cr	0.30

ตารางที่ ก 4 คุณสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมจากลวดเชื่อม ER110S-G

คุณสมบัติเชิงกล	หมายเหตุ
ความแข็งแรงดึง (MPa)	910
ความแข็งแรงคราก (MPa)	810
อัตราการยืดตัว (%)	18
ความแข็งแรงกระแทก (Charpy) (J)	120 ที่ 20 °C

ที่มา: Welding Guide

Bohler Welding Technology

Bohler Schweißtechnik Austria GMBH

ก.3 ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ เลือกใช้ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS A5.29-E110T-K4 (EN :1999 12535 69 5 Mn2NiCrMo B3 H5) เป็นลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับการเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง โดยมีคุณสมบัติ ดังนี้

ตารางที่ ก 5 ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E110T5-K4H4

ธาตุผสม (Alloying elements)	เปอร์เซ็นต์ (%)
C	0.05
Mn	1.40
Si	0.60
Mo	0.50
Ni	2.40
Cr	0.50
S	0.015
P	0.005

ตารางที่ ก 6 คุณสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E110T5-K4H4

คุณสมบัติเชิงกล	หมายเหตุ
ความแข็งแรงดึง (MPa)	900
ความแข็งแรงคราก (MPa)	840
อัตราการยืดตัว (%)	20
ความแข็งแรงกระแทก (Charpy) (J)	60 ที่ -51 °C

ที่มา: Technical data sheet

Welding alloying Thailand

ภาคผนวก ข

เครื่องผสมแก๊ส (Gas Mixer)

เครื่องผสมแก๊สรุ่นนี้ใช้สำหรับ 2 แก๊ส ออกแบบมาเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม
ที่ใช้แก๊สผสมแตกต่างกัน โดยมีทรงกระบอกตรงไว้เพื่อต่อกับถังแก๊ส

ลักษณะทั่วไปของเครื่องผสมแก๊ส

Type	BM-2M
Gases	Ar/CO ₂ (0-25%) or N ₂ /CO ₂ (0-100%) other
gases	on request
Pressure settings	
inlet pressure	min. 4.5 bar, max. 230 bar
outlet pressure	max. 3 bar
Opening pressure of safety relief valves	max. 6 bar
Mixture output (air)	8-25 Nl/min.
Setting accuracy	±1% abs. (scale 0-25%), ±2% abs. (scale 0-100%)
Mixing precision	better than ±1% abs.
Gas connections	
inlets	cylinder connection DIN 477
outlet	G 1/4 EN 560
Housing	aluminum, coated
Weight	approx. 3.2 kg
Dimensions (HxWxD)	approx. 230 x 156 x 130 mm. (9.0 x 6.2 x 5.1 inch) (without connections)
Approvals	Company certified according to ISO 9001:2000 and ISO 14001

Benefits

- No more components required e.g. pressure control – for low costs
- Compact design
- Easy to install

- Protection of the following system with 2 integrated safety relief valves against dangerous overpressures

Easy operation

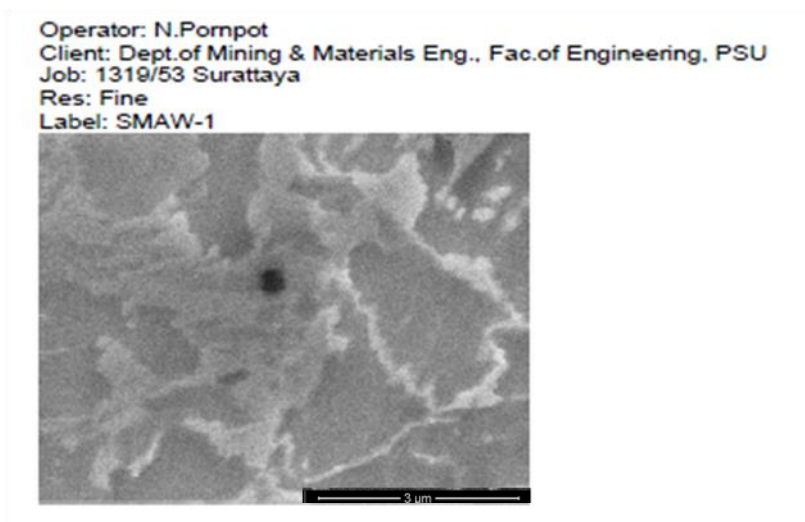
- A proportional mixing valve with a control knob and %-scale provides infinitely variable mixture settings
- Infinitely variable flow setting with scaled turning knob

High process reliability

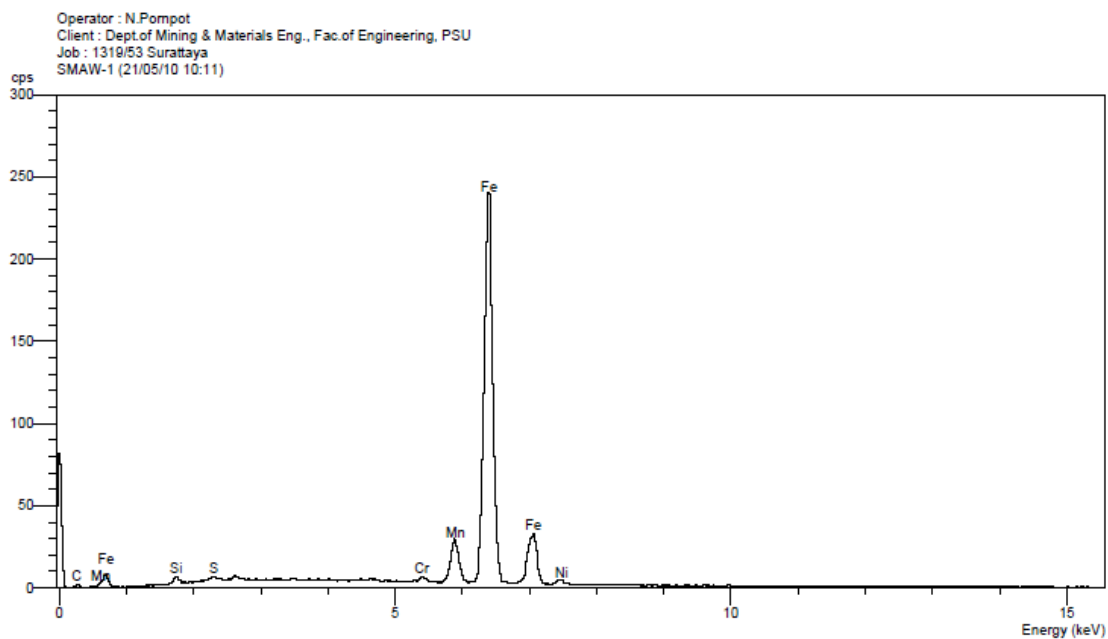
- Independent of pressure fluctuations in the gas supply
- independent of withdrawal fluctuations (in permitted range)

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบชนิดและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบใน inclusion ของเนื้อเชื่อม

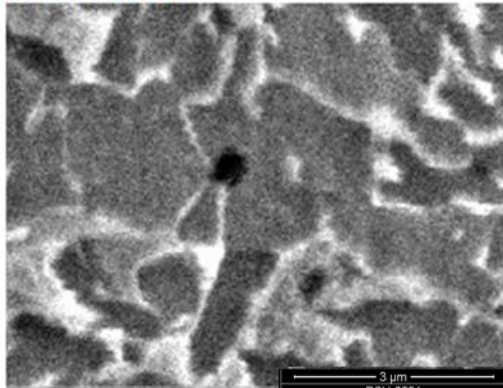


รูปที่ ค1 โครงสร้างของ inclusion ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อม
 หุ้มฟลักซ์ (MMA-1)

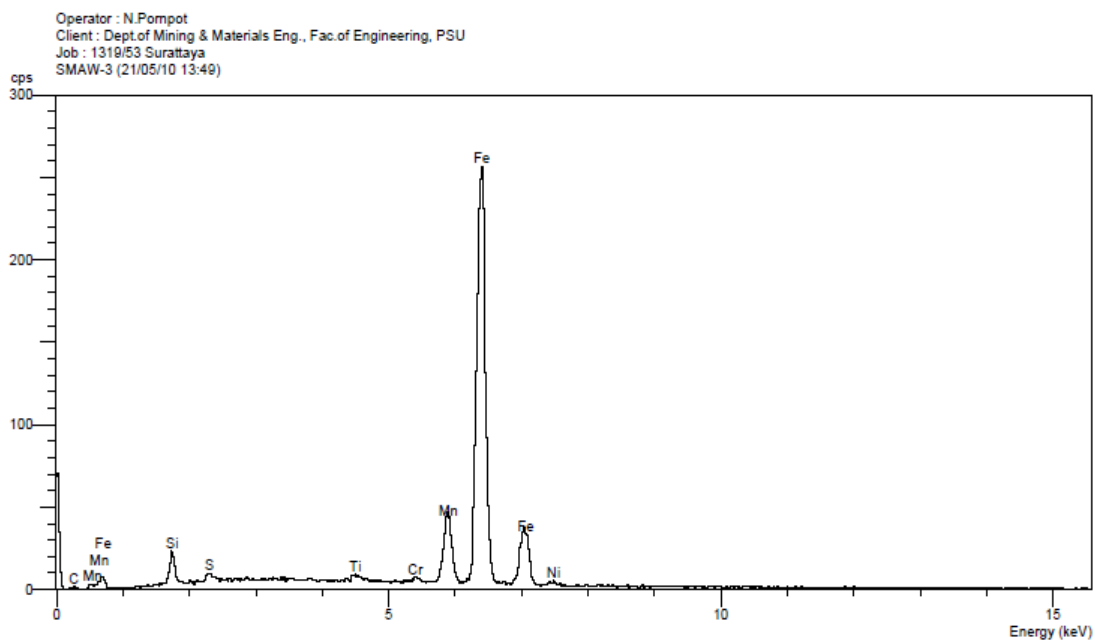


รูปที่ ค2 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน inclusion ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วย
 กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (MMA-1)

Operator: N.Pompot
 Client: Dept.of Mining & Materials Eng., Fac.of Engineering, PSU
 Job: 1319/53 Surattaya
 Res: Fine
 Label: SMAW-3

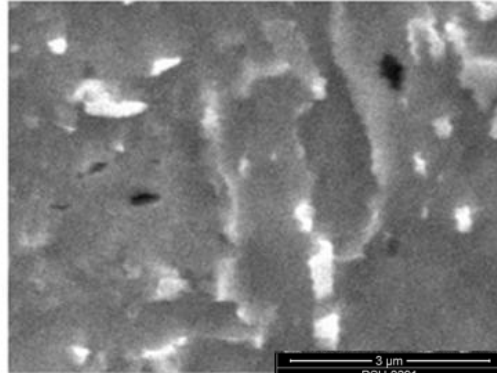


รูปที่ ค3 โครงสร้างของ inclusion ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (MMA-3)

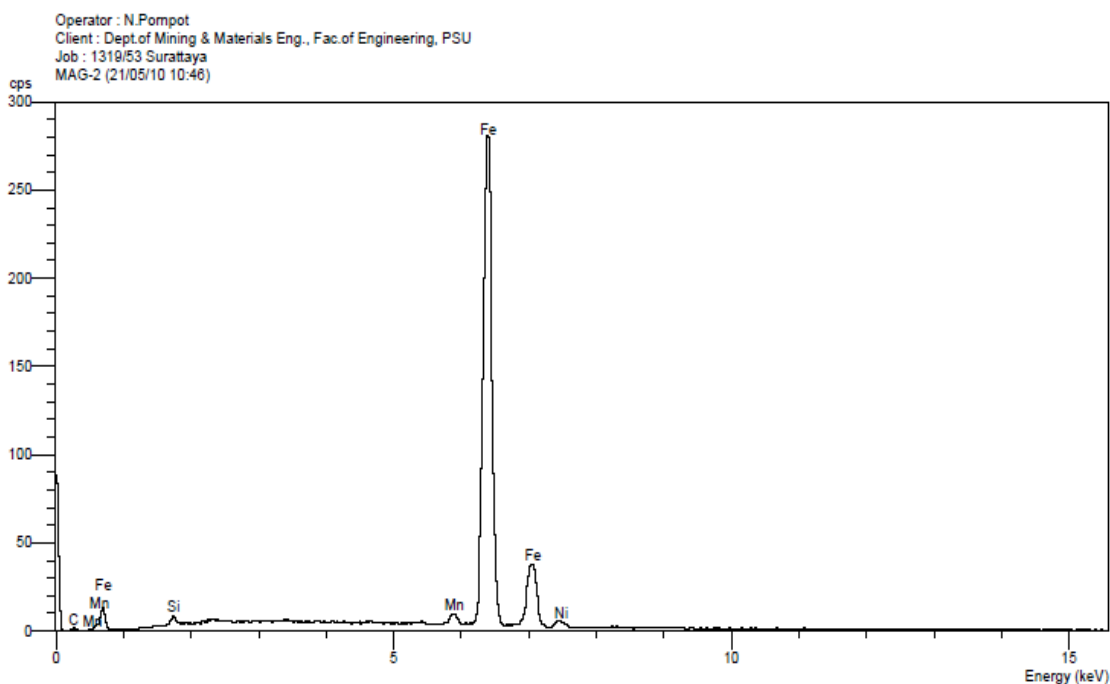


รูปที่ ค4 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน inclusion ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (MMA-3)

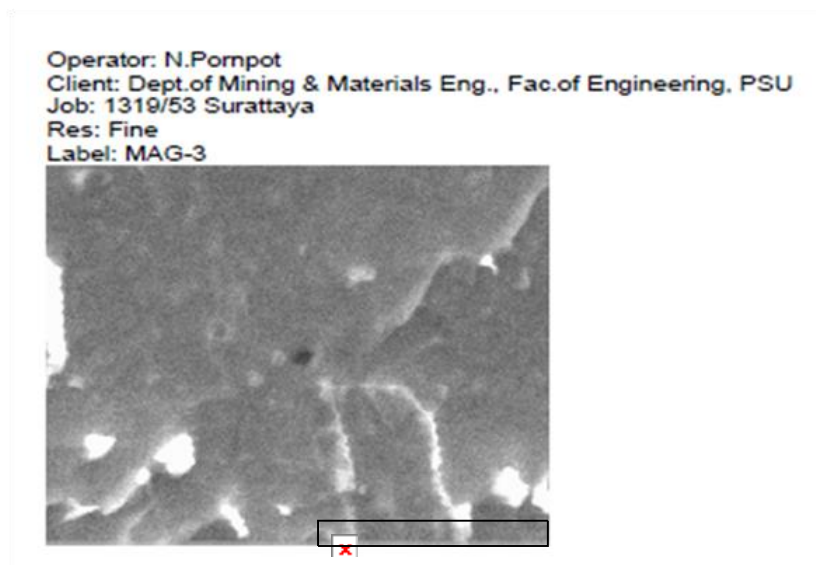
Operator: N.Pompot
 Client: Dept.of Mining & Materials Eng., Fac.of Engineering, PSU
 Job: 1319/53 Surattaya
 Res: Fine
 Label: MAG-2



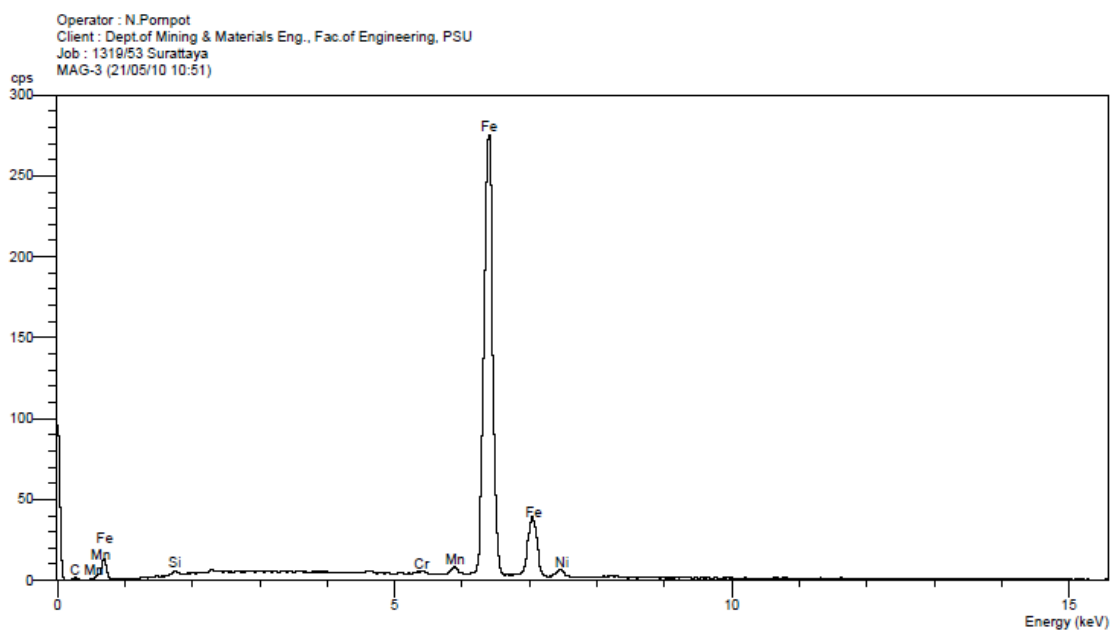
รูปที่ ค5 โครงสร้างจุลภาคของ inclusion ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก (MIG/MAG-2)



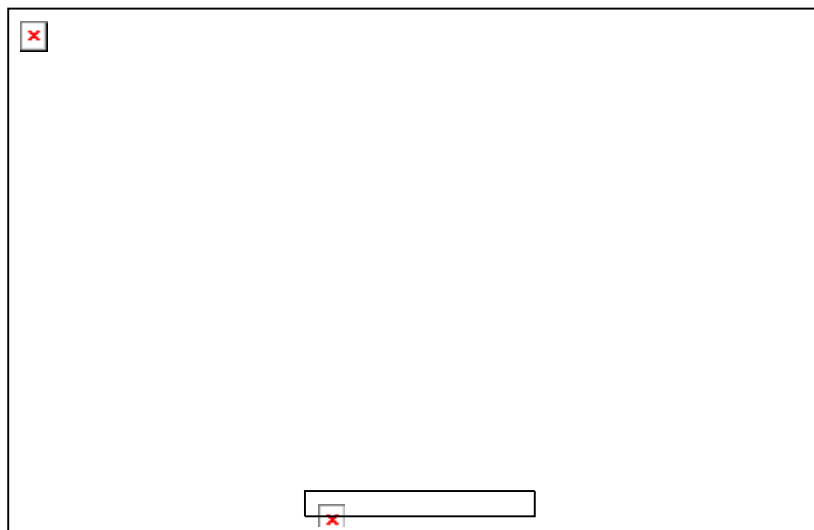
รูปที่ ค6 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน inclusion ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก (MIG/MAG-2)



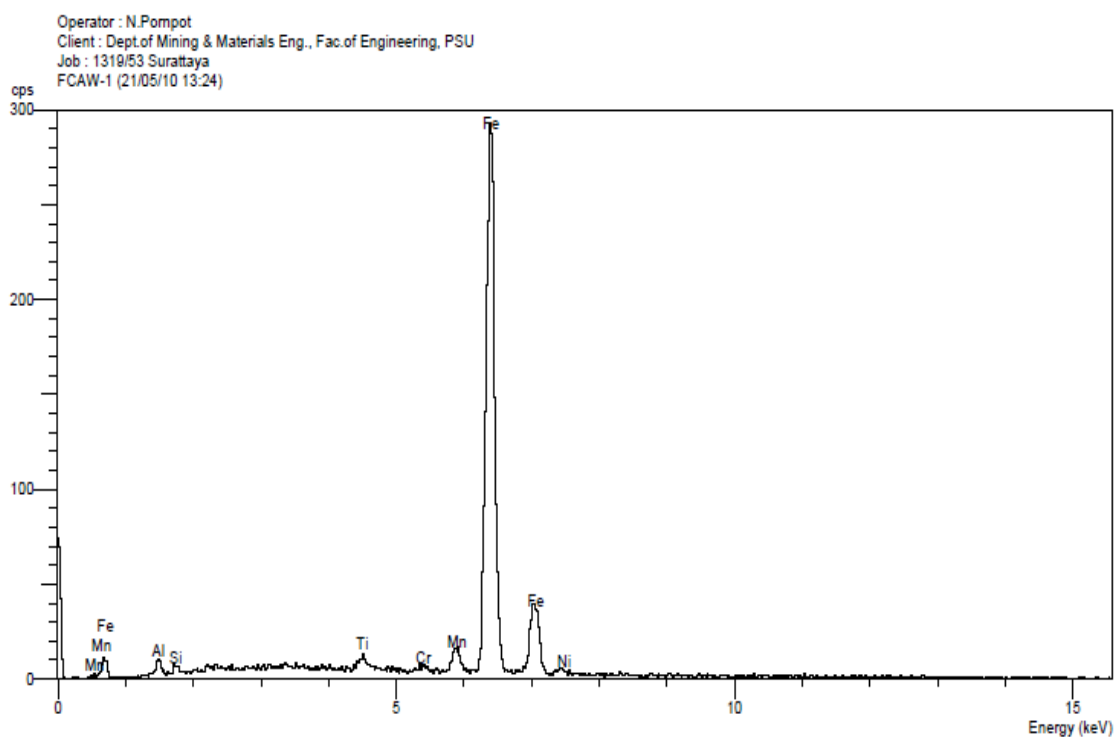
รูปที่ ค7 โครงสร้างจุลภาคของ inclusion ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก /แมก (MIG/MAG-3)



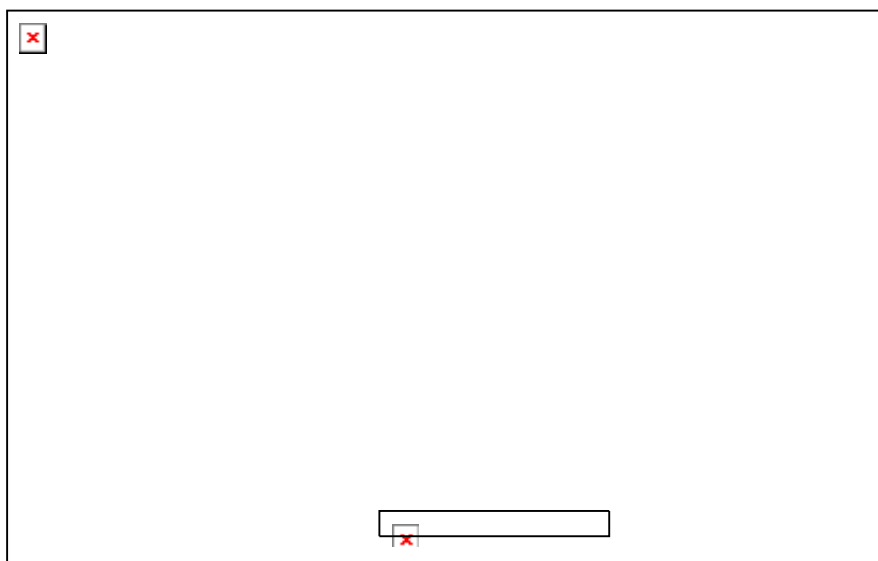
รูปที่ ค8 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน inclusion ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก (MIG/MAG-3)



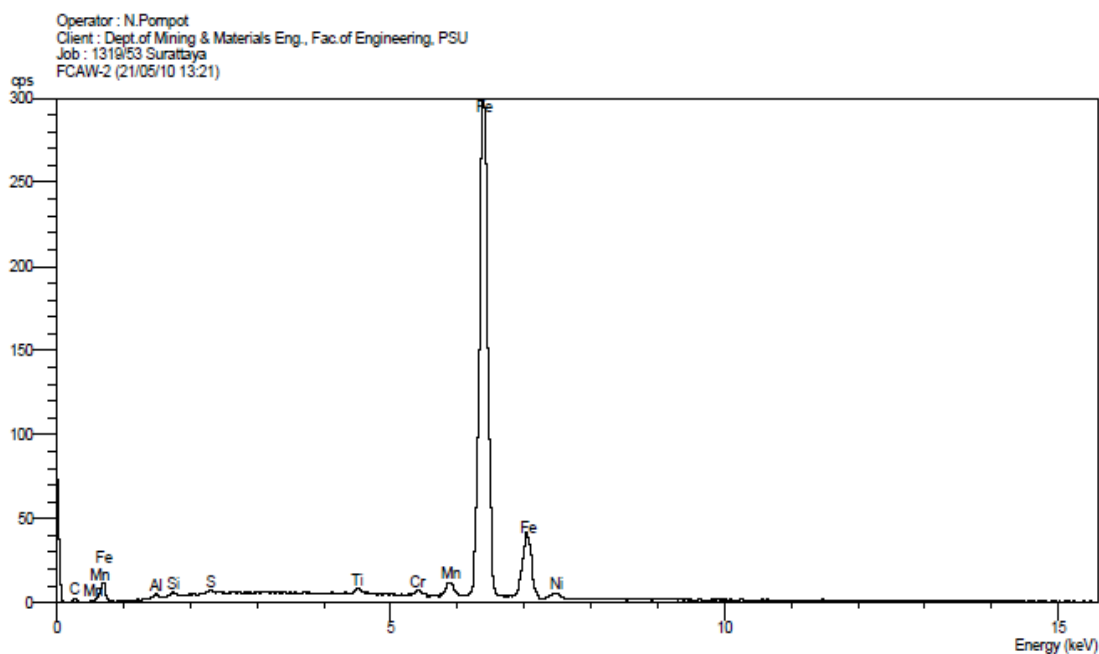
รูปที่ ๙ โครงสร้างจุลภาคของ inclusion ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW-1)



รูปที่ ๑๐ ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน inclusion ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW-1)



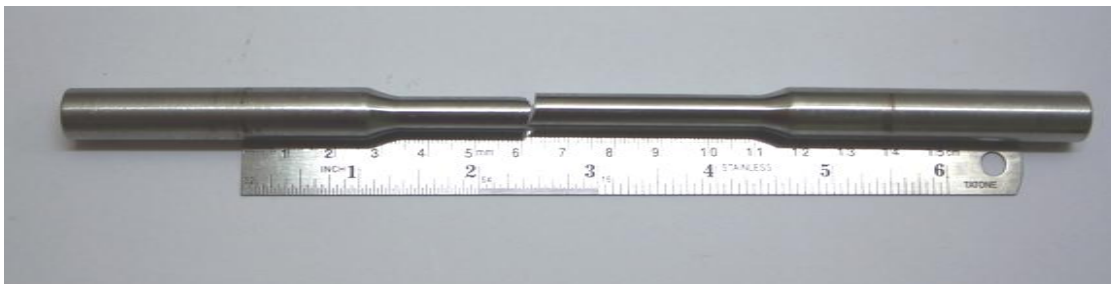
รูปที่ ค11 โครงสร้างจุลภาคของ inclusion ภายในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW-2)



รูปที่ ค12 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน inclusion ในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW-2)

ภาคผนวก ง

บริเวณที่ขึ้นทดสอบความแข็งแรงล้าขาด



รูปที่ 1 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MMA ทดสอบที่ 350 MPa



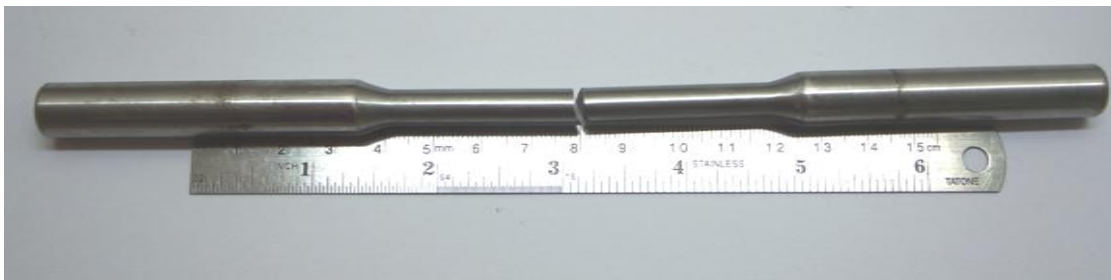
รูปที่ 2 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MMA ทดสอบที่ 400 MPa



รูปที่ 3 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ทดสอบที่ 400 MPa ชั้นที่ 1



รูปที่ 4 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ทดสอบที่ 400 MPa ชั้นที่ 2



รูปที่ ๖5 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ทดสอบที่ 400 MPa ชั้นที่ 1



รูปที่ ๖6 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม FCAW ทดสอบที่ 400 MPa ชั้นที่ 1



รูปที่ ๖7 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ทดสอบที่ 400 MPa ชั้นที่ 1



รูปที่ ๖8 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ทดสอบที่ 400 MPa ชั้นที่ 2



รูปที่ 9 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ทดสอบที่ 500 MPa ชั้นที่ 1



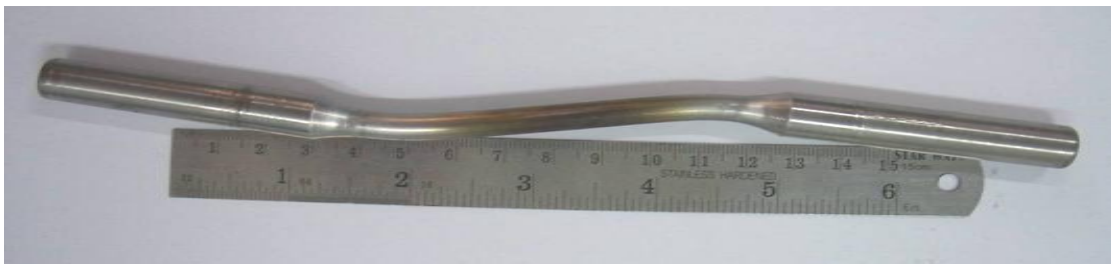
รูปที่ 10 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม FCAW ทดสอบที่ 500 MPa ชั้นที่ 1



รูปที่ 11 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MMA ทดสอบที่ 600 MPa ชั้นที่ 1



รูปที่ 12 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MMA ทดสอบที่ 600 MPa ชั้นที่ 2



รูปที่ 13 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงจากเนื้อเชื่อม MAG ทดสอบที่ 600 MPa ชั้นที่ 1



รูปที่ 14 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงจากเนื้อเชื่อม MAG ทดสอบที่ 600 MPa ชั้นที่ 2



รูปที่ 15 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ทดสอบที่ 600 MPa ชั้นที่ 1



รูปที่ 16 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึงเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ทดสอบที่ 600 MPa ชั้นที่ 2



รูปที่ ง17 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MMA ทดสอบที่ 700 MPa ชั้นที่ 1



รูปที่ ง18 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม MAG ทดสอบที่ 700 MPa ชั้นที่ 1



รูปที่ ง19 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม FCAW ทดสอบที่ 700 MPa ชั้นที่ 1



รูปที่ ง20 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าเหล็กกล้าผสมคาร์บอน AISI 4340 ทดสอบที่ 700 MPa ชั้นที่ 1



รูปที่ ง21 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าจากเนื้อเชื่อม FCAW ทดสอบที่ 800 MPa



รูปที่ ง22 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้าเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ทดสอบที่ 800 MPa

ภาคผนวก จ

ค่าทดสอบความแข็งของเนื้อเชื่อมหลายชั้น

จ.1 ค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

ตารางที่ จ1 ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

ระยะทาง (mm.)	ค่าความแข็ง (HV)			
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	แนวที่ 3	เฉลี่ย
0	252.4	333.8	256.6	280.9
0.5	303.1	307	292	300.7
1	270.9	262.7	237.7	257.1
1.5	275.6	249.5	315	280.0
2	264.1	240.4	238.5	247.7
2.5	282.8	293	282.3	286.0
3	272.7	248.3	249.5	256.8
3.5	269	313.3	261.9	281.4
4	275.1	233.6	247.9	252.2
4.5	304.8	243.1	239.6	262.5
5	266.8	270.9	245.1	260.9
5.5	277.5	278.4	247.5	267.8
6	279.4	273.2	249.5	267.4
6.5	280.9	255.4	237.3	257.9
7	368.6	262.3	247.1	292.7
7.5	262.7	270	261	264.6
8	261.9	254.5	257.5	258.0
8.5	251.2	263.6	245.5	253.4
9	264.5	255.8	250.4	256.9
9.5	238.8	252.4	236.2	242.5
10	230.6	261.9	234.3	242.3
10.5	237.3	264.5	249.1	250.3

ตารางที่ จ1 ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์
(ต่อ)

ระยะทาง (mm.)	ค่าความแข็ง (HV)			
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	แนวที่ 3	เฉลี่ย
11	227	256.2	239.6	240.9
11.5	225.3	263.6	238.1	242.3
12	225.3	219.7	239.2	228.1
12.5	234.7	243.5	242.7	240.3
13	216.7	240.8	236.2	231.2
13.5	216.1	247.1	241.2	234.8
14	222.5	235.1	238.5	232.0
14.5	229.2	257.5	243.1	243.3
15	226.3	232.8	238.5	232.5
15.5	232.8	247.5	239.2	239.8
16	240.8	257.1	243.1	247.0
16.5	215.1	244.3	238.8	232.7
17	245.1	237.7	240.4	241.1
17.5	240.8	257.5	227.7	242.0
18	236.9	242.7	233.2	237.6
18.5	226.7	237.7	238.1	234.2
19	232.5	252.8	240	241.8
19.5	230.6	240	231.4	234.0
20	224.2	245.1	241.2	236.8
20.5	212.2	240	243.9	232.0
21	229.2	254.1	235.4	239.6
21.5	236.6	256.2	237.3	243.4
22	240.4	245.9	227.7	238.0

ตารางที่ จ1 ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์
(ต่อ)

ระยะทาง (mm.)	ค่าความแข็ง (HV)			
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	แนวที่ 3	เฉลี่ย
22.5	240.4	257.9	244.7	247.7
23	235.1	264.5	239.2	246.3
23.5	235.4	256.7	248.3	246.8
24	243.9	254.9	240	246.3
24.5	240.8	251.2	226.3	239.4
25	231.4	256.2	239.6	242.4
25.5	226.7	263.6	230.6	240.3
26	224.2	251.6	230.3	235.4
26.5	223.9	257.5	231	237.5
27	232.8	249.9	236.6	239.8
27.5	220.8	262.7	225.6	236.4
28	228.8	256.2	227	237.3
28.5	226	243.5	226.3	231.9
29	229.2	244.7	243.1	239.0
29.5	247.1	253.3	252.4	250.9
30	231.7	246.7	230.3	236.2
30.5	230.6	241.9	241.2	237.9
31	237.3	253.7	232.8	241.3
31.5	249.5	245.9	235.4	243.6
32	257.1	251.6	227	245.2
32.5	253.3	248.7	248.7	250.2
33	255.8	247.9	249.1	250.9
33.5	254.5	247.5	223.9	242.0

ตารางที่ จ1 ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์
(ต่อ)

ระยะทาง (mm.)	ค่าความแข็ง (HV)			
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	แนวที่ 3	เฉลี่ย
34	230.3	245.9	237.7	238.0
34.5	235.8	243.5	247.1	242.1
35	238.1	252.4	237.3	242.6
35.5	236.6	251.6	232.5	240.2
36	225.3	261	227	237.8
36.5	228.5	245.1	223.2	232.3
37	232.8	254.9	235.8	241.2
37.5	223.5	258.4	227.4	236.4
38	227.4	261.9	226.7	238.7
38.5	224.9	252.8	236.9	238.2
39	232.5	253.7	243.5	243.2
39.5	234.3	258.8	260.1	251.1
40	235.8	262.7	271.3	256.6
40.5	236.6	264.5	254.1	251.7
41	238.1	254.5	303.1	265.2
41.5	241.5	258.4	263.6	254.5
42	244.3	269	255.8	256.4
42.5	252.8	266.8	233.2	250.9
43	229.9	210.6	258.8	233.1
43.5	238.5	259.7	245.5	247.9
44	241.2	273.2	247.9	254.1
44.5	229.9	261.4	249.1	246.8
45	226.3	257.5	244.7	242.8

ตารางที่ จ1 ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์
(ต่อ)

ระยะทาง	ค่าความแข็ง			
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	แนวที่ 3	เฉลี่ย
45.5	254.9	250.4	251.2	252.2
46	240.8	266.3	246.7	251.3
46.5	241.9	260.1	251.2	251.1
47	233.2	268.1	262.7	254.7
47.5	238.5	340.2	268.6	282.4
48	248.7	243.5	274.6	255.6
48.5	261.4	262.3	278.4	267.4
49	281.4	298.8	281.4	287.2
49.5	279.4	261.9	270.4	270.6
50	299.9	270.4	282.3	284.2
50.5	286.8	260.1	275.6	274.2
51	289.9	238.1	273.2	267.1
51.5	298.8	232.8	286.3	272.6
52	293.5	255.4	270.9	273.3
52.5	297.7	236.6	278.9	271.1
53	301	250.4	281.9	277.8
53.5	297.7	267.2	278.9	281.3
54	281.9	267.7	277	275.5
54.5	282.8	268.6	280.4	277.3
55	255.8	270.4	224.9	250.4

จ.2 ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก

ตารางที่ จ2 ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก

ระยะทาง (mm.)	ค่าความแข็ง (HV)			
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	แนวที่ 3	เฉลี่ย
0	275.1	290.4	278.4	281.3
0.5	274.2	266.3	267.7	269.4
1	272.7	277.5	268.6	272.9
1.5	277.5	289.4	262.7	276.5
2	272.3	280.9	270.9	274.7
2.5	292	278.4	254.1	274.8
3	296.1	274.2	260.1	276.8
3.5	283.8	272.7	250.4	269.0
4	298.3	235.8	282.3	272.1
4.5	286.3	243.1	263.2	264.2
5	279.4	243.1	255.8	259.4
5.5	288.9	257.1	199.3	248.4
6	274.2	258.4	201.4	244.7
6.5	266.3	259.7	209.6	245.2
7	256.2	260.5	216.4	244.4
7.5	239.6	221.4	210.6	223.9
8	254.1	228.5	205.6	229.4
8.5	249.5	220.1	217.1	228.9
9	264.5	224.2	219.4	236.0
9.5	268.1	222.8	212.8	234.6
10	245.5	222.1	214.1	227.2
10.5	249.9	209.6	213.1	224.2
11	209.6	224.6	204.7	213.0
11.5	230.3	227	205.3	220.9

ตารางที่ จ2 ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก (ต่อ)

ระยะทาง (mm.)	ค่าความแข็ง (HV)			
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	แนวที่ 3	เฉลี่ย
12	217.4	221.8	199.3	212.8
12.5	199	224.9	211.8	211.9
13	201.1	222.8	201.4	208.4
13.5	201.7	219.4	202.5	207.9
14	204.4	228.1	198.1	210.2
14.5	204.1	232.1	184.1	206.8
15	216.1	223.2	178.6	206.0
15.5	205.3	214.8	179.3	199.8
16	214.1	213.8	190.8	206.2
16.5	209.9	212.8	204.1	208.9
17	213.8	219.1	208	213.6
17.5	214.4	216.7	200.8	210.6
18	213.1	209.3	204.7	209.0
18.5	216.1	236.9	195.8	216.3
19	225.6	220.4	197.6	214.5
19.5	228.1	220.8	191.9	213.6
20	213.5	223.9	204.7	214.0
20.5	231.7	227	207.7	222.1
21	216.7	218.1	211.5	215.4
21.5	218.7	225.3	210.6	218.2
22	196.4	210.6	202.8	203.3
22.5	203.1	219.7	210.2	211.0
23	208	222.5	218.1	216.2
23.5	215.4	232.1	210.6	219.4

ตารางที่ จ2 ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก (ต่อ)

ระยะทาง (mm.)	ค่าความแข็ง (HV)			
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	แนวที่ 3	เฉลี่ย
24	213.8	219.7	206.2	213.2
24.5	224.9	224.6	192.7	214.1
25	214.4	227.7	204.1	215.4
25.5	213.8	223.5	203.8	213.7
26	221.8	219.4	211.2	217.5
26.5	223.5	207.1	212.8	214.5
27	214.4	227	209.9	217.1
27.5	226.3	225.3	204.7	218.8
28	207.1	222.5	220.1	216.6
28.5	210.6	216.7	223.2	216.8
29	205.6	217.1	218.7	213.8
29.5	202.5	223.2	213.1	212.9
30	215.4	234.3	215.4	221.7
30.5	211.2	215.7	216.1	214.3
31	208.4	220.4	200.8	209.9
31.5	214.4	211.2	215.1	213.6
32	209	184.1	208	200.4
32.5	226.3	221.1	211.2	219.5
33	229.9	216.7	210.6	219.1
33.5	216.4	231	214.8	220.7
34	223.5	221.8	213.8	219.7
34.5	228.5	216.4	223.2	222.7
35	229.2	223.9	205.6	219.6
35.5	218.7	218.7	219.1	218.8

ตารางที่ จ2 ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก (ต่อ)

ระยะทาง (mm.)	ค่าความแข็ง (HV)			
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	แนวที่ 3	เฉลี่ย
36	208.4	218.1	212.5	213.0
36.5	197.6	223.5	210.2	210.4
37	207.7	220.8	214.4	214.3
37.5	195	224.9	220.1	213.3
38	207.1	210.2	214.4	210.6
38.5	199.6	223.5	220.1	214.4
39	202.3	203.1	207.1	204.2
39.5	203.5	212.5	212.8	209.6
40	202.8	215.4	209	209.1
40.5	215.4	219.4	204.1	213.0
41	213.5	222.1	203.1	212.9
41.5	204.4	219.7	206.5	210.2
42	216.1	222.8	221.4	220.1
42.5	209.9	215.1	214.1	213.0
43	207.1	225.6	209.6	214.1
43.5	210.9	233.6	205.3	216.6
44	217.1	234.3	223.5	225.0
44.5	209.9	227.4	219.4	218.9
45	206.5	269.5	210.2	228.7
45.5	214.8	340.2	220.1	258.4
46	260.1	246.7	247.5	251.4
46.5	312.7	233.6	251.6	266.0
47	254.5	249.5	261.9	255.3
47.5	278.9	269.5	272.7	273.7

ตารางที่ จ2 ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก (ต่อ)

ระยะทาง (mm.)	ค่าความแข็ง (HV)			
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	แนวที่ 3	เฉลี่ย
48	254.9	292.5	296.8	281.4
48.5	245.1	288.9	252.7	262.2
49	252.4	284.8	288.9	275.4
49.5	286.8	269	269.4	275.1
50	290.4	257.1	298.6	282.0
50.5	270.9	296.7	276.7	281.4
51	262.3	303.1	283.4	282.9
51.5	279.4	242.7	272.3	264.8
52	319.7	250.4	289.7	286.6

จ.3 ค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมใ้ฟลักซ์

ตารางที่ จ3 ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมใ้ฟลักซ์

ระยะทาง (mm.)	ค่าความแข็ง (HV)			
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	แนวที่ 3	เฉลี่ย
0	281.9	315.6	289	295.5
0.5	255.4	316.2	296.1	289.2
1	284.8	300.4	284.3	289.8
1.5	278.9	285.3	271.3	278.5
2	280.9	304.8	265.4	283.7
2.5	273.7	305.9	286.3	288.6
3	297.7	301	279.4	292.7
3.5	289.4	301	272.7	287.7
4	292	298.3	240.4	276.9
4.5	300.4	296.7	248.7	281.9

ตารางที่ ๖3 ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมใส่ฟลักซ์ (ต่อ)

ระยะทาง (mm.)	ค่าความแข็ง (HV)			
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	แนวที่ 3	เฉลี่ย
5	291.4	292	259.7	281.0
5.5	287.3	298.8	283.8	290.0
6	295.6	311	284.3	297.0
6.5	284.3	306.5	291.4	294.1
7	276.5	287.3	322.7	295.5
7.5	280.4	284.3	271.3	278.7
8	290	283.8	296.7	290.2
8.5	278.4	256.2	274.6	269.7
9	278.4	274.2	276.5	276.4
9.5	282.3	263.6	295.1	280.3
10	287.3	269	285.8	280.7
10.5	267.7	278.4	282.8	276.3
11	268.6	269	298.8	278.8
11.5	277.6	276.5	278	277.4
12	279.4	274.6	271.8	275.3
12.5	261	276.1	285.3	274.1
13	267.7	303.1	272.7	281.2
13.5	247.5	279.4	263.6	263.5
14	265	292	265.4	274.1
14.5	262.3	286.8	231.4	260.2
15	269.5	279.4	286.8	278.6
15.5	248	296.1	275.6	273.2
16	273.7	293	277	281.2
16.5	254.9	294.6	288.9	279.5

ตารางที่ ๑3 ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมไส้ฟลักซ์ (ต่อ)

ระยะทาง (mm.)	ค่าความแข็ง (HV)			
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	แนวที่ 3	เฉลี่ย
17	255.8	297.7	284.8	279.4
17.5	283.8	297.7	292.5	291.3
18	255.4	291.4	279.9	275.6
18.5	277.5	315.6	259.2	284.1
19	249.5	301	272.3	274.3
19.5	257.1	333	268.1	286.1
20	257.9	301.5	257.1	272.2
20.5	292	292	275.6	286.5
21	314.4	288.9	245.1	282.8
21.5	294.6	279.9	247.9	274.1
22	303.7	287.3	251.2	280.7
22.5	298.3	253.7	254.5	268.8
23	315.6	265	263.2	281.3
23.5	323.3	268.1	262.7	284.7
24	301	266.3	268.6	278.6
24.5	279.9	269	265	271.3
25	294.6	276.1	241.2	270.6
25.5	287.3	269	272.3	276.2
26	269.1	267.2	272.3	269.5
26.5	276.1	273.7	248.7	266.2
27	259.7	252.8	257.9	256.8
27.5	247.9	278.4	238.5	254.9
28	260.1	277.5	231.7	256.4
28.5	254.1	270.4	258.4	261.0

ตารางที่ ๖3 ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมไส้ฟลักซ์ (ต่อ)

ระยะทาง (mm.)	ค่าความแข็ง (HV)			
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	แนวที่ 3	เฉลี่ย
29	260.1	299.3	246.7	268.7
29.5	261	263.6	240	254.9
30	255.8	268.6	241.9	255.4
30.5	256.2	247.9	249.1	251.1
31	260.5	266.8	247.5	258.3
31.5	263.2	264.5	260.5	262.7
32	243.9	254.9	255.4	251.4
32.5	251.2	267.7	255.8	258.2
33	257.9	276	249.5	261.1
33.5	246.3	260.5	236.6	247.8
34	267.7	269.5	231.7	256.3
34.5	259.2	266.8	239.6	255.2
35	260.5	260.1	290.9	270.5
35.5	261.9	263.2	244.7	256.6
36	257.9	256.6	254.1	256.2
36.5	252.8	275.7	231.7	253.4
37	246.7	256.6	226	243.1
37.5	257.9	270.9	242.7	257.2
38	262.7	261.4	231.7	251.9
38.5	257.1	255.4	240	250.8
39	251.2	281.4	241.2	257.9
39.5	266.8	288.9	245.5	267.1
40	272.3	285.3	247.5	268.4
40.5	277	278	245.5	266.8

ตารางที่ ๑3 ค่าความแข็งที่ทดสอบเนื้อเชื่อมหลายชั้นจากกรรมวิธีการเชื่อมใ้ฟลักซ์ (ต่อ)

ระยะทาง (mm.)	ค่าความแข็ง (HV)			
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	แนวที่ 3	เฉลี่ย
41	267.7	266.8	239.6	258.0
41.5	264.5	278.4	245.1	262.7
42	260.5	265.9	247.1	257.8
42.5	247.9	288.4	259.7	265.3
43	276.1	297.7	252	275.3
43.5	260.1	309.8	258	276.0
44	268.6	285.3	243	265.6
44.5	256.2	284.3	249.1	263.2
46	257.9	275.6	245.9	259.8
46.5	255	264.1	295.6	271.6
47	259.2	255.9	270	261.7
47.5	277.5	266.3	288.4	277.4
48	281.4	297.7	272.7	283.9
48.5	265.9	301	254.1	273.7
49	304.8	284.3	254.9	281.3
49.5	325.7	273.7	261.4	286.9
50	296.1	285.3	268.6	283.3
50.5	333.8	271.8	264.1	289.9
51	298.8	276.5	269	281.4
51.5	296.1	286.8	287.3	290.1
52	289.4	303.7	275.1	289.4
52.5	297.7	272.7	270.4	280.3

