

การปรับปรุงโลหะเชื่อมอาร์กวดิวไฟฟลักซ์พอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กกล้า
คาร์บอน JIS-S50C ด้วยความร้อน

HEAT TREATMENT OF HARD-FACING FLUX-CORED ARC
WELD METAL ON JIS-S50C CARBON STEEL SURFACE

ธราพร กัปโก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การปรับปรุงโลหะเชื่อมอาร์กวดิวไฟลักซ์พอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กกล้า
คาร์บอน JIS-S50C ด้วยความร้อน

ธราพร กัปโก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

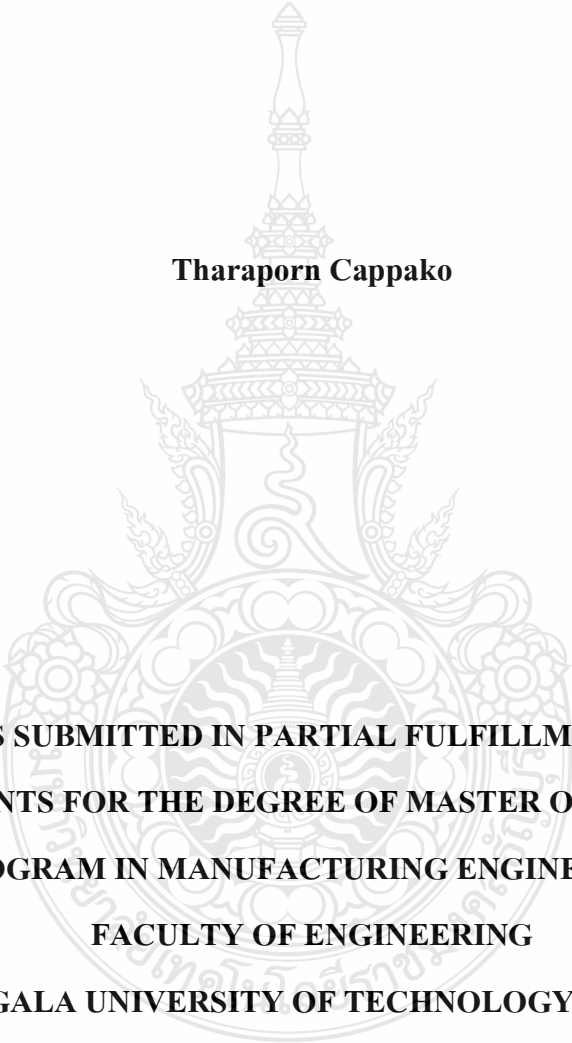
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**Heat Treatment of Hard-facing Flux-cored Arc Weld Metal on
JIS-S50C Carbon Steel Surface**

Tharaporn Cappako



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
PROGRAM IN MANUFACTURING ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING**

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

ACADEMIC YEAR 2014

COPYRIGHT OF RAJAMANGALA UNIVERSITY

OF TECHNOLOGY THANYABURI

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงโลหะเชื่อมพอกแข็งบนผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ด้วยความร้อน
ชื่อ - นามสกุล	นางสาวธราพร กัปโก
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

การปรับปรุงโลหะเชื่อมด้วยความร้อนหลังการเชื่อมเป็นวิธีการที่นิยมใช้แพร่หลายในการปรับปรุงชิ้นส่วนที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยการเชื่อม และเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของโลหะเชื่อมได้ดี ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยจึงมีจุดประสงค์ในการศึกษาการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนโลหะเชื่อมอาร์กสวดไส้ฟลักซ์พอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C

วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ เหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C (กว้าง 100 mm ยาว 150 mm และหนา 20 mm) ชั้นพอกแข็ง 3 ชั้นถูกทำการเชื่อมพอกด้วยการเชื่อมอาร์กสวดไส้ฟลักซ์ด้วยตัวแปรการเชื่อมที่กำหนด ชิ้นทดสอบที่ผ่านการเชื่อมพอกแข็งถูกนำไปปรับปรุงด้วยความร้อนด้วยวิธีการอบคืนไฟ การอบอ่อน และการชุบแข็ง ชิ้นทดสอบที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนถูกเตรียมเพื่อการตรวจสอบสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกแข็ง

ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ อุณหภูมิและรอบการให้ความร้อนของการอบอ่อนและการชุบแข็งส่งผลทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานและการเกิดการแตกร้าวที่พื้นที่กระแทกร้อนของชิ้นทดสอบ การชุบแข็ง 3 รอบทำให้เกิดการบิดเบี้ยวและการแตกร้าวขนาดใหญ่ที่สุดในการทดลองนี้ โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกแข็งแสดงเฟสเสริมแรงที่มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการชุบแข็ง นอกจากนั้นเฟสเสริมแรงที่เกิดมีลักษณะการต่อกันเป็นพื้นที่โครงข่ายขนาดใหญ่และส่งผลทำให้ความแข็งแรงลดลง การปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนไม่แนะนำให้ใช้ในการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนโลหะเชื่อมอาร์กสวดไส้ฟลักซ์พอกแข็ง

คำสำคัญ: การเชื่อมอาร์กสวดไส้ฟลักซ์ การเชื่อมพอกแข็ง กระบวนการทางความร้อน

Thesis Title	Heat Treatment of Hard facing Weld Metal on JIS-S50C Carbon Steel Surface
Name – Surname	Miss. Tharaporn Cappako
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Kittipong Kimapong, Ph.D.
Academic Year	2014

ABSTRACT

A post weld heat treatments (PWHT) is a widely used method to improve the part that was repaired by welding process. This PWHT can efficiently modify the microstructure and improve the weld metal properties. Therefore, this research aimed to study a heat treatment of hard-facing flux-cored arc welding metal on the JIS-S50C carbon steel surface.

This experiment was carried out by using the JIS-S50C carbon steel sized 100 mm. in width, 150 mm. in length and 20 mm. in thick. The 3 layers of a hard-facing were produced on the workpiece material by using the flux-cored arc welding process with given welding parameters. The hard-faced specimens were heat-treated by using different processes such as tempering, annealing and hardening. Then, the heat treated specimens were prepared for examined the mechanical properties and microstructure of the hardfacing welded metal.

The experimental results can be summarized as follows. The temperature and heat cycle of both annealing and hardening processes were not only affected the specimen distortion but also generated crack at the heat affected zone of the welded specimen. The 3 cycles of the hardening process produced the largest distortion and the largest crack in this study. The microstructure of the heat treated hardfacing metal revealed that reinforcement phase was larger than the one with no heat treatment. Furthermore, this reinforcement phase also connected to be a large network area and resulted in decrease weld hardness. The experimental results suggested that the heat treatment processes were not suitable for improving the mechanical properties of the hardfaced metal produced by flux-cored arc welding.

Keywords: flux cored arc welding, hardfaced welding, heat treatment

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล คณะกรรมการสอบ และดร.สมพงษ์ พิริยานต์ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณบุคลากรของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ขอขอบคุณ อ.สุริยา ประสมทองและคณาจารย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ(สุพรรณบุรี) นายเจษฎา แก้ววิจิตร นายอรรถกร จันทร์ชนะ นายยอดเปรม ภูกำเนิด และท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงอีกหลายท่าน ที่สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ และให้ความช่วยเหลือ ตลอดช่วงเวลา ของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิ-คณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชา บ่มเพาะวิชาการจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และ ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธราพร กัปโก



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	14
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน	16
2.2 การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม	19
2.3 การเชื่อมชั้นรองพื้น (Buffer Layer Welding).....	21
2.4 การเชื่อมพอกผิวแข็ง.....	21
2.5 การอบชุบ.....	22
2.6 การตีกรอ.....	30
2.7 การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อม.....	33
2.8 การตรวจสอบทางโลหะวิทยา.....	33
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	38
3.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย.....	38
3.2 กระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม	44
3.3 การตัดชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องไมโครคัตเตอร์.....	46
3.4 การขัดกระดาษทราย.....	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การทดสอบสมบัติทางกล.....	47
3.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา.....	48
3.7 การทดสอบการสึกหรอ.....	50
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....	52
4.1 อิทธิพลของกระแสเชื่อมที่ผลต่อโครงสร้างมหภาค.....	52
4.2 อิทธิพลของกระแสเชื่อมที่ผลต่อความแข็งจุลภาค.....	56
4.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้นแบบไม่มีชั้นรองพื้น และมีชั้นรองพื้นที่กระแสเชื่อม 150-210 A.....	58
4.4 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	62
4.5 การปรับปรุงสมบัติของชั้นพอกผิวแข็งด้วยความร้อน อบอ่อน ชุบแข็ง และการ อบคืนไฟ.....	64
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	70
บรรณานุกรม.....	71
ภาคผนวก.....	75
ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	76
ประวัติผู้เขียน.....	93

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าตาม AISI และ ASME.....	18
ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์และส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้ามาตรฐาน JIS G4051.....	18
ตารางที่ 2.3 น้ำยากัดชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E304	34
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเชื่อม JIS S50C	38
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง	38



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอน ความแข็งแรงดึง และความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอน.....	17
รูปที่ 2.2 ลักษณะของการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม.....	20
รูปที่ 2.3 แผนภาพสรุปรูปแบบของการอบชุบสำหรับ (ก) เหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอย และ (ข) เหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอย	23
รูปที่ 2.4 อิทธิพลของคาร์บอนและการอบชุบต่อสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน.....	25
รูปที่ 2.5 โครงสร้างซีเมนไตท์กลมมนในพื้นที่เฟอไรท์ กำลังขยาย 850 เท่า.....	25
รูปที่ 2.6 การทำออสเทมเปอร์ิ่งและการอบอ่อนที่อุณหภูมิคงที่ในเหล็กกล้า 1080	26
รูปที่ 2.7 แผนภูมิ TTT ของ (ก) เหล็กกล้า 1050 และ (ข) เหล็กกล้า 10110 (γ_u หมายถึงออสเทนไนท์ที่ไม่เสถียร และพร้อมในการเปลี่ยนแปลง)	26
รูปที่ 2.8 แผนภูมิ TTT สำหรับ (ก) เหล็กกล้า 1050 และ (ข) เหล็กกล้า 10110	28
รูปที่ 2.9 ผลของอุณหภูมิการอบคืนไฟต่อสมบัติ ทางกลเหล็กกล้า 1050.....	28
รูปที่ 2.10 แผนภูมิ CCT (เส้นทึบ) ของเหล็กกล้า 1080 เปรียบเทียบกับแผนภูมิ TTT (เส้นประ)...	28
รูปที่ 2.11 แผนภูมิ CCT ของเหล็กกล้าผสมต่ำ 0.2%C.....	28
รูปที่ 2.12 การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear)	31
รูปที่ 2.13 การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear).....	31
รูปที่ 2.14 การสึกหรอแบบการล้า (Fatigue wear)	32
รูปที่ 2.15 การสึกหรอแบบสึกกร่อน (Corrosive or oxidation wears)	32
รูปที่ 2.16 ลักษณะห้วงทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส.....	33
รูปที่ 2.17 ทิศทางการจัดกระจายทราย	34
รูปที่ 2.18 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	35
รูปที่ 2.19 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	36
รูปที่ 3.1 ชิ้นงานมีขนาดอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS Z3114.....	39
รูปที่ 3.2 การเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น แบบรองพื้นด้วยลวด MIG-70S	39
รูปที่ 3.3 การเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น แบบไม่รองพื้น.....	39
รูปที่ 3.4 การเชื่อมชิ้นงานตาม JIS Z311	40
รูปที่ 3.5 ลักษณะอุปกรณ์ควบคุมความเร็วในการเชื่อม	40

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.6 ลักษณะเครื่องเชื่อมมิก.....	41
รูปที่ 3.7 การตัดชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องเลื่อยระบบชัก.....	41
รูปที่ 3.8 การเจียรระโนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องเจียรระโน.....	42
รูปที่ 3.9 ชิ้นงานที่ผ่านการเจียรระโน.....	42
รูปที่ 3.10 การตั้งชิ้นงานทดสอบในการเชื่อม.....	43
รูปที่ 3.11 ปืนวัดอุณหภูมิ.....	43
รูปที่ 3.12 การตอกรหัสชิ้นงานเชื่อมก่อนการอบชุบ.....	44
รูปที่ 3.13 แผนภาพขั้นตอนกระบวนการทางความร้อน.....	45
รูปที่ 3.14 ลักษณะการอบชุบแข็งในน้ำ.....	45
รูปที่ 3.15 ลักษณะการเย็นตัวในอากาศ.....	45
รูปที่ 3.16 การตัดชิ้นงานทดสอบ.....	46
รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการตัดแบ่ง.....	46
รูปที่ 3.18 วิธีการขัดชิ้นงานทดสอบ.....	47
รูปที่ 3.19 ลักษณะทิศทางการกดด้วยเครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์สroyกกดตามมาตรฐาน JIS Z 3114.....	48
รูปที่ 3.20 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส.....	48
รูปที่ 3.21 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	49
รูปที่ 3.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	50
รูปที่ 3.23 เครื่องทดสอบการสึกหรอ.....	51
รูปที่ 4.1 โครงสร้างมหภาคแบบไม่ร่องพื้นกระแผลเชื่อม 150, 170, 190 และ 210 A.....	52
รูปที่ 4.2 การวัดขนาดแนวเชื่อมแบบไม่มีชั้นร่องพื้นด้วยกระแผลเชื่อมต่างกัน.....	54
รูปที่ 4.3 โครงสร้างมหภาคแบบมีชั้นร่องพื้นกระแผลเชื่อม 150, 170, 190 และ 210 A.....	54
รูปที่ 4.4 การวัดขนาดแนวเชื่อมแบบมีชั้นร่องพื้นด้วยกระแผลเชื่อมที่ต่างกัน.....	56
รูปที่ 4.5 ความแข็งจุลภาคของกระแผลเชื่อม 150 – 210 A แบบไม่มีชั้นร่องพื้น.....	57
รูปที่ 4.6 ความแข็งจุลภาคของกระแผลเชื่อม 150 – 210 A แบบมีชั้นร่องพื้น.....	57
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูญหาย กระแผลเชื่อมของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น แบบไม่มีชั้นร่องพื้นและมีชั้นร่องพื้นที่เชื่อมด้วยกระแผลเชื่อม 150-210 A.....	58

สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้นแบบไม่มีชั้นรองพื้น กำลังขยาย 200 เท่า	59
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบความแข็งจุลภาคของเฟสสีขาวกับเฟสสีดำแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้นแบบไม่มีชั้นรองพื้น	60
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้นแบบมีชั้นรองพื้น กำลังขยาย 200 เท่า	61
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้นแบบไม่มีชั้นรองพื้น กำลังขยาย 200 เท่า	62
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3.....	62
รูปที่ 4.13 ตำแหน่งการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของผิวการทดสอบการสึกหรอ	63
รูปที่ 4.14 รูปจำลองการบิดแอ่นตัวและลักษณะรอยแตกชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน.....	64
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบความแข็งจุลภาคปรับปรุงสมบัติของชั้นพอกผิวแข็งด้วยความร้อนอบอ่อน ชุบแข็ง และการอบคืนไฟ	65
รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มีชั้นรองพื้น กำลังขยาย 200 เท่า	66
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีชั้นรองพื้น กำลังขยาย 200 เท่า.....	67
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูญหายของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น แบบไม่มีชั้นรองพื้นและมีชั้นรองพื้นที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 210 A ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน.....	68

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

kgf	แรงกด (กิโลกรัม)
mm	มิลลิเมตร
mm/min	ความเร็วเดินเชื่อม (Welding Speed)
A	กระแสเชื่อม
BM	โลหะเดิม (Base Metal)
CAW	การเชื่อมอาร์กคาร์บอน
CCT	อัตราการเย็นตัวของเหล็กกล้า
FCAW	การเชื่อมอาร์กถวดไส้ฟลักซ์
GMAW	กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding)
HAZ	บริเวณกระทบร้อน (Heat Affect Zone)
HSLA	เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง
HV	หน่วยความแข็ง (Micro Hardness Viker)
MIG Welding	การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม
SMAW	การเชื่อมอาร์กถวดหุ้มฟลักซ์
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope)
TIG Welding	การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุม
WM	บริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลส่วนมากจะได้รับการสัมผัส ชัด และเสียดสีกับชิ้นส่วนต่างๆ อย่างมาก จึงส่งผลทำให้ชิ้นส่วนเกิดการสึกหรอและมีขนาดของชิ้นส่วนลดลง ส่งผลให้ลดประสิทธิภาพในการทำงานลดลงหรือชำรุดเสียหาย ด้วยเหตุผลของราคาชิ้นส่วนเครื่องจักรกลนั้นมีราคาสูง หากมีวิธีการในการนำเอาชิ้นส่วนเก่าที่สึกหรอกลับมาใช้ใหม่โดยการซ่อมแซมและปรับปรุงส่วนที่สึกหรอ อาจทำให้ต้นทุนการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลลดลงได้

การเชื่อมซ่อม (Welding Repair Process) โดยกรรมวิธีการเชื่อมพอกผิวแข็งเป็นการเชื่อมซ่อมที่สามารถเพิ่มเติมเนื้อโลหะและเพิ่มความแข็งให้กับโลหะหลัก โดยสามารถทำได้ด้วยกระบวนการเชื่อมหลายวิธี เช่น การเชื่อมพอกผิวแข็งเพื่อซ่อมชิ้นส่วนแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่นบาง ด้วยวิธีการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas Welding: TIG Welding) หรือการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม การเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์อาจมีความเหมาะสมมากกว่า เนื่องจากการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เป็นวิธีการเชื่อมที่ง่าย อุปกรณ์การเชื่อมไม่ยุ่งยากซับซ้อน และราคาต่อหน่วยของเครื่องเชื่อมต่ำ นอกจากนี้หากเปรียบเทียบเกรดของลวดเชื่อมแล้วพบว่า ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็งที่มีในอุตสาหกรรมงานเชื่อมส่วนใหญ่เป็นลวดเชื่อมที่ผลิตออกมาเพื่อวิธีการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ [1] ดังนั้นการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็งจึงอาจเป็นวิธีการเชื่อมที่มีความเหมาะสมในการนำมาเชื่อมซ่อมส่วนที่สึกหรอของใบมีดสับอ้อย ที่ผ่านมาพบว่าการเชื่อมอาร์กพอกผิวแข็งวัสดุหลายชนิดและให้สมบัติของผิวพอกแข็งดังต้องการ เช่น เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High Strength Low Alloy: HSLA) [2] เหล็กหล่อสีเทา (Grey cast iron) [2-4] เหล็กหล่อเหนียว [5, 6] เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ [7-11] เหล็กกล้าผสมหรือเหล็กพิเศษอื่นๆ [12-15]

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีกรอบแนวคิดที่จะนำเอาเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C มาทำการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยวิธีการเชื่อมอาร์กลวดไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding Process) ซึ่งใช้เชื่อมพอกผิวแข็งเพื่อป้องกันการสึกหรอ (Wear Resistance Hardfacing) แล้วทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) และทำการศึกษาอิทธิพลการปรับปรุงสมบัติทางกลของผิวพอกแข็งด้วยกรรมวิธีทางความร้อน เพื่อให้ผิวพอกแข็งมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น เพื่อเป็นการเตรียมข้อมูลนำไปเผยแพร่สู่ช่างซ่อมบำรุงเครื่องจักรกล และเพื่อลดต้นทุนในการซ่อมบำรุงรักษาและ

เป็นการเพิ่มมูลค่าชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเก่าที่ผ่านการใช้งานแล้วให้สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ ผลการทดลองที่ได้จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อด้านอุตสาหกรรมและยังสามารถนำความรู้ไปในการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรกลได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนหลังการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติของชิ้นพอกผิวแข็งการเชื่อมอาร์กถวดไส้หุ้มฟลักซ์

1.2.2 ศึกษาและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของชิ้นพอกผิวแข็งการเชื่อมอาร์กถวดไส้หุ้มฟลักซ์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การเชื่อมอาร์กถวดเชื่อมไส้หุ้มฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding Process) ในการเชื่อมชิ้นงานทดลอง

1.3.2 ขนาดชิ้นงานขนาดกว้าง 100 mm ยาว 150 mm และหนา 20 mm เชื่อมตามมาตรฐานชิ้นงานเชื่อม JIS Z3114

1.3.3 ศึกษาตัวแปรการเชื่อม

1) กระแสไฟเชื่อม 150, 170, 190 และ 210 A

2) ความเร็วเดินแนวเชื่อม 150 mm/min

3) การปรับปรุงด้วยความร้อน คือ การชุบแข็ง การอบคืนไฟ และการอบอ่อน

1.3.4 ศึกษาสมบัติทางกลด้วยวิธีการทดสอบความต้านทานการลึกรหรือ ความต้านทานการกระแทก ความแข็งไมโครวิกเกอร์ส์

1.3.5 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและมหภาค

1.3.6 ถวดเชื่อมพอกผิวแข็งตามมาตรฐาน DIN 8555: MF-6-GF-60-GP

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1.4.1 ทราบถึงตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมในการเชื่อมอาร์กถวดเชื่อมไส้หุ้มฟลักซ์ เหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C

1.4.2 เพื่อทราบถึงโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C ด้วยการเชื่อมอาร์กถวดเชื่อมไส้หุ้มฟลักซ์

1.4.3 เพื่อให้เป็นทางเลือกใช้ในการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กถวดเชื่อมใต้น้ำฟลักซ์

1.4.4 เพื่อเป็นแนวทางที่จะช่วยในการพัฒนาการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กถวดเชื่อมใต้น้ำฟลักซ์ในงานอุตสาหกรรม และเป็นข้อมูลในการวิจัยต่อไป



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน

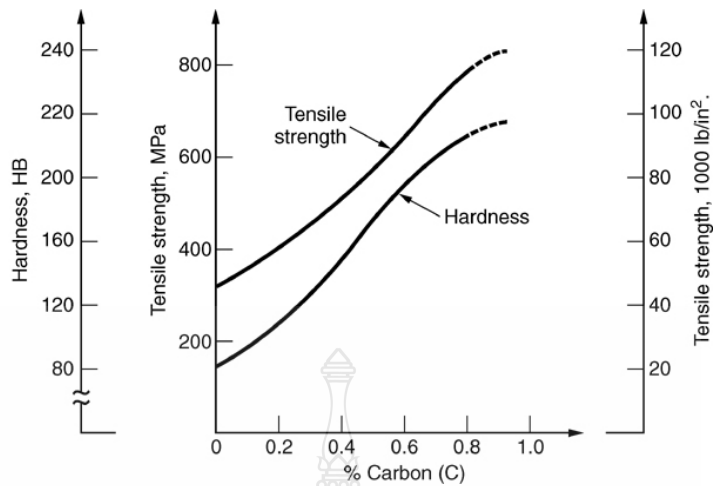
คือ โลหะผสมที่มีเหล็กเป็นโลหะหลักและมีธาตุคาร์บอนเป็นธาตุผสม ปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้ามีค่า 0.02-2.11% โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นในเหล็กกล้ามีธาตุผสมอื่นๆ เช่น นิกเกิล แมงกานีส โครเมียม และ โมลิบดีนัม อย่างไรก็ตามปริมาณของธาตุต่างๆ เหล่านี้มีค่าค่อนข้างต่ำ ปริมาณของคาร์บอนในเหล็กกล้าที่ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าแสดงในรูปที่ 5 ที่ความแข็งแรงและความแข็งของเหล็กกล้ามีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อมีปริมาณของคาร์บอนสูงเกินไป เช่น ปริมาณคาร์บอนสูงกว่า 0.8% การนำเอาเหล็กกล้าคาร์บอนมาใช้งานควรมีความระมัดระวังเป็นพิเศษ เนื่องจากโลหะมีความแข็งแรงและความแข็งสูง ความเปราะสูง และความสามารถในการยืดตัวเนื่องจากการดึง (Ductility) ของเหล็กกล้าคาร์บอนมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนสูงมีความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) เพื่อเปลี่ยนเป็นโครงสร้างมาเทนไซต์ได้ดี

เหล็กกล้าคาร์บอน สามารถแบ่งกลุ่มได้ตามปริมาณของคาร์บอนในเหล็กกล้าดังนี้

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ มีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.20% การใช้งาน เช่น ทำตัวถังรถยนต์ แผ่นเหล็กกล้าในประกอบผลิตภัณฑ์ต่างๆ และรางรถไฟ เป็นต้น

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง มีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.20-0.5% การใช้งาน เช่น ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เฟลาถูกเบี้ยวในเครื่องยนต์ เป็นต้น

เหล็กกล้าคาร์บอนสูง มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่า 0.5% การใช้งาน เช่น สปริง เครื่องมือตัด หรือ ชิ้นส่วนต้านทานการสึกหรอ (Wear resistant part)



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอน ความแข็งแรงดึง และความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอน

Askeland และ Phule [16] ได้แสดงการแบ่งแยกชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนตามสมาคมเหล็กและเหล็กกล้าแห่งอเมริกา (American Iron and Steel Institute: AISI) และสมาคมวิศวกรเครื่องกลแห่งอเมริกา (American Society of Mechanical Engineering: ASME) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยระบบในการแบ่งกลุ่มเหล็กกล้าในการนำไปใช้งาน โดยการกำหนดตัวเลขขึ้นมาใช้ในการเรียก 4 ตัว ให้ตัวเลขสองตัวแรกหมายถึงธาตุผสมหลักในเหล็กกล้าชิ้นนั้น ขณะที่ตัวเลขสองตัวสุดท้ายหมายถึงปริมาณคาร์บอนในเหล็ก เช่น ตัวอย่าง เหล็กกล้า AISI1040 คือ เหล็กกล้าคาร์บอน (ตัวเลข 10) ที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 0.4% (ตัวเลข 40) เหล็กกล้า SAE10120 คือ เหล็กกล้าคาร์บอน (ตัวเลข 10) ที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 1.2% (ตัวเลข 120) เป็นต้น

เหล็กกล้าสามารถแบ่งกลุ่มได้ตามส่วนผสมทางเคมี หรือรูปแบบการผลิตเหล็กกล้าชิ้นนั้นๆ ดังตัวอย่างต่อไปนี้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) คือ เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลักมีปริมาณไม่เกิน 2% และประกอบไปด้วยซิลิกอนไม่เกิน 0.6% และแมงกานีสไม่เกิน 1.65% หรือเหล็กกล้าดีคาบูไรซ์ (Decarburized steel) ที่มีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 0.05% เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำพิเศษ (Ultra-low carbon steel) คือ เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลักมีปริมาณไม่เกิน 0.03% และซิลิกอนและแมงกานีสเล็กน้อย เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) คือ เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลักมีปริมาณ 0.04-0.15% เป็นวัสดุในการทำตัวถังและโครงสร้างรถยนต์ และการใช้งานอื่นๆ [16]

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าตาม AISI และ ASME [16]

AISI-SAE Number	% C	% Mn	% Si	% Ni	% Cr	Others
1020	0.18–0.23	0.30–0.60				
1040	0.37–0.44	0.60–0.90				
1060	0.55–0.65	0.60–0.90				
1080	0.75–0.88	0.60–0.90				
1095	0.90–1.03	0.30–0.50				
1140	0.37–0.44	0.70–1.00				0.08–0.13% S
4140	0.38–0.43	0.75–1.00	0.15–0.30		0.80–1.10	0.15–0.25% Mo
4340	0.38–0.43	0.60–0.80	0.15–0.30	1.65–2.00	0.70–0.90	0.20–0.30% Mo
4620	0.17–0.22	0.45–0.65	0.15–0.30	1.65–2.00		0.20–0.30% Mo
52100	0.98–1.10	0.25–0.45	0.15–0.30		1.30–1.60	
8620	0.18–0.23	0.70–0.90	0.15–0.30	0.40–0.70	0.40–0.60	0.15–0.25% Y
9260	0.56–0.64	0.75–1.00	1.80–2.20			

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์และส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้ามาตรฐาน JIS G4051 [17]

สัญลักษณ์	ส่วนผสมทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)				
	C	Si	Mn	P	S
S 10C	0.08-0.13	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S 12C	0.10-0.15	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S 15C	0.13-0.18	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S 17C	0.15-0.20	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S 20C	0.18-0.23	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S 22C	0.20-0.25	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S 25C	0.22-0.28	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S 28C	0.25-0.31	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 30C	0.27-0.33	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 33C	0.30-0.36	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 35C	0.32-0.38	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 38C	0.35-0.41	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 40C	0.37-0.43	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 43C	0.40-0.46	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 45C	0.42-0.48	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 48C	0.45-0.51	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์และส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้ามาตรฐาน JIS G4051 [17] (ต่อ)

S 50C	0.47-0.53	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 53C	0.50-0.56	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 55C	0.52-0.53	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 58C	0.55-0.61	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 09C K	0.07-0.12	0.10-0.35	0.30-0.60	0.025 max.	0.025 max.
S 15C K	0.13-0.18	0.15-0.35	0.30-0.60	0.025 max.	0.025 max.
S 20C K	0.18-0.23	0.15-0.35	0.30-0.60	0.025 max.	0.025 max.

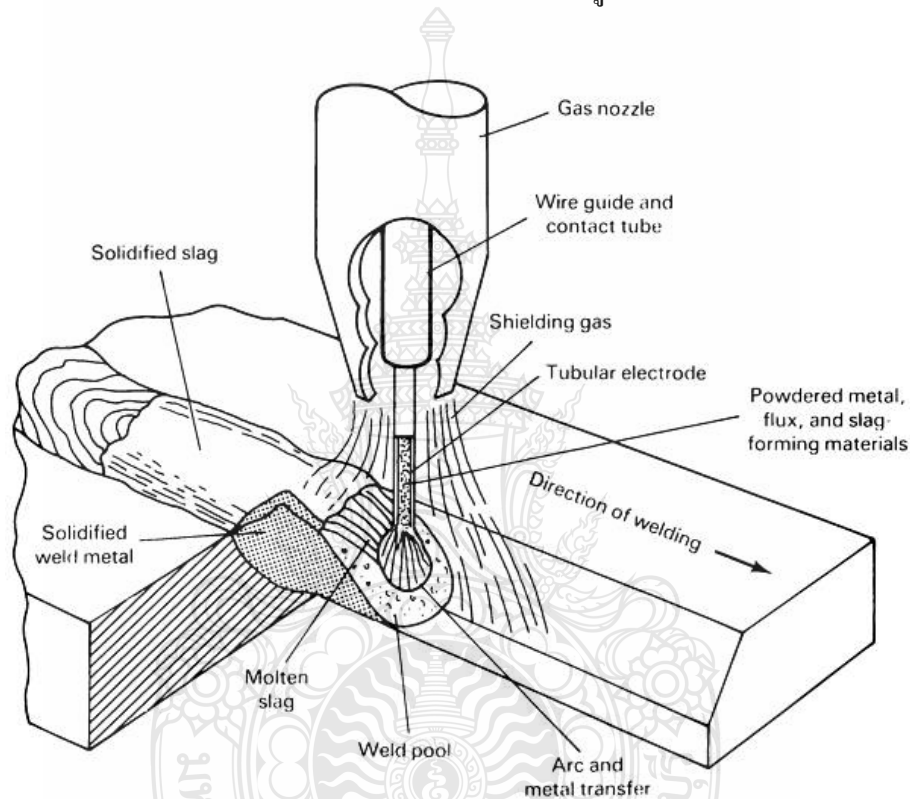
นอกจากนั้นในตารางที่ 2.1 ได้แสดงการแบ่งแยกชนิดของเหล็กกล้าผสม (Alloy steel) คือเหล็กกล้าที่มีธาตุผสมหลักตัวอื่นๆ เข้ามาเพิ่มนอกเหนือจากคาร์บอน เช่น ในตารางที่ 2.1 เหล็กกล้าที่ตัวเลขขึ้นต้นด้วยเลข 4 ถึง 9 มีธาตุผสมหลักอื่นๆ เช่น ซิลิกอน นิกเกิล หรือ โครเมียมเพิ่มเข้ามา เพื่อปรับปรุงสมบัติตามต้องการ ขณะที่ตัวเลขสองตัวสุดท้ายเป็นตัวแสดงปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าผสมดังแสดงในเหล็กกล้าคาร์บอน [16]

การใช้งานเหล็กกล้าคาร์บอนในอุตสาหกรรมไทยนิยมใช้เหล็กกล้าที่มีมาตรฐานควบคุมการผลิต คือ มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (Japanese industrial standard: JIS) ที่กำหนดให้เหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับโครงสร้างเครื่องจักรซึ่งผลิตจากการขึ้นรูปร้อน เช่น การรีดร้อน หรือการตีขึ้นรูปร้อน หลังจากนั้นนำไปทำการตัด การขึ้นรูป และการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน เรียกลักษณะนี้ว่าเหล็กกล้า เหล็กกล้าแบ่งกลุ่มออกเป็น 23 กลุ่มและมีสัญลักษณ์ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ส่วนผสมจากเป่าหลอม สารมลทินต่างๆ เช่น Cu Ni Cr Ni+Cr สำหรับกลุ่ม S09CK S15CK S20CK มีปริมาณไม่เกิน 0.25% 0.20% 0.30% และ Cu Ni Cr และ Ni+Cr สำหรับกลุ่มอื่นๆ ไม่ควรเกิน 0.30% 0.20% และ 0.35% เหล็กกล้า 3 กลุ่ม คือ S09SK S15K และ S20CK ใช้สำหรับจุดมุ่งหมายในการทำชุบผิวแข็งด้วยคาร์บอน (Case hardening) เหล็กกล้าควรทำการผลิตจากแท่งอินกอทเหล็กกล้าคิลด์ (Killed steel ingot) และทำการรีดหรือตีขึ้นรูปจากแท่งอินกอทที่อัตราส่วนการตีขึ้นรูปไม่น้อยกว่า 4S [17]

2.2 การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม [18]

มานะศิษฐ์ พิมพ์สาร ได้อธิบายการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม เป็นกระบวนการเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อมเปลือยขนาดเล็กลงจากม้วนลวด ซึ่งถูกป้อนผ่านหัวเชื่อมหรือปืนเชื่อม (Torch or Welding

gun) ออกมาอย่างต่อเนื่องผ่านท่อนำลวดและท่อนำกระแส (Contact tip) ลวดเชื่อมจะสัมผัสกับผิวที่นำกระแสทำให้กระแสเชื่อมไหลเข้าสู่ลวด เมื่อปลายลวดแตะกับผิวโลหะชิ้นงานจะเกิดการอาร์กขึ้น ความร้อนจากอาร์กจะหลอมผิวโลหะชิ้นงาน และปลายลวดเชื่อมให้เป็นหยดโลหะถ่ายโอนสู่บ่อหลอมเหลวของรอยเชื่อม ขณะเดียวกันแก๊สจากท่อบรรจุจะไหลเข้าที่จ่ายตู้หัวฉีดพุ่งออกมาปกคลุมบ่อหลอมเหลวและบริเวณรอบเปลวอาร์กและโลหะที่กำลังหลอมเหลว แก๊สกลุ่มที่เลือกใช้ได้แก่ แก๊สเฉื่อย แอคทีฟแก๊ส อันริแอคทีฟแก๊ส และแก๊สผสม แสดงดังในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะของการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม [19]

2.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมพลาสมา

อุปกรณ์ที่ใช้เหมือนกันกับกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมเมื่อใช้ลวดเชื่อมที่ต้องการแก๊สปกคลุมจากภายนอกจะแตกต่างกันเพียงเครื่องเชื่อมและหัวเชื่อมที่มีขนาดใหญ่กว่า สำหรับการเชื่อมที่ใช้ลวดเชื่อมแบบ Self-Shielding จะไม่ใช้ถังแก๊สปกคลุม, เครื่องควบคุมความดัน, เครื่องวัดปริมาณการไหลแก๊ส, สายแก๊ส, โซลินอยด์วาล์วและนอชเชิลของหัวเชื่อมหัวเชื่อมที่ไม่มีนอชเชิลจะออกแบบหัวทิวที่แตกต่างจากหัวทิวทั่วไปปลายของหัวเชื่อมมีขนาดเล็กเพื่อให้การมองเห็นขณะเชื่อมดีขึ้นบริเวณอาร์กที่เกิดจากการเชื่อมพลาสมาจะมีควันมากจึงจำเป็นต้องมีท่อดูดควันอยู่ที่หัวเชื่อม [20]

2.2.2 หลักรการเชื่อมฟลักซ์คอร์

การเชื่อมฟลักซ์คอร์ได้รับความร้อนจากการอาร์ระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงานหลอมละลายผิวหน้าโลหะงานและปลายลวดเชื่อมโลหะลวดเชื่อมหลอมละลายจะถูกส่งถ่ายผ่านอาร์กสู่ชิ้นงานกลายเป็นแนวเชื่อมแก่สปกคลุมได้จากการหลอมละลายของฟลักซ์ภายในลวดเชื่อม ซึ่งฟลักซ์ไม่เพียงแต่จะทำให้แก่สปกคลุมเท่านั้นยังทำหน้าที่กำจัดออกซิเจน, แตะตัวเป็นอ็อกไซด์ทำให้เกิดความบริสุทธิ์และเติมธาตุผสมอีกด้วยส่วนแก่สปกคลุมเพิ่มเติมจากภายนอกนั้นจะส่งผ่านไปยังนอชเชิลของหัวเชื่อมเพื่อปกคลุมบริเวณอาร์กภายในลวดเชื่อมเมื่อหลอมละลายแล้วจะลอยตัวปกคลุมเนื้อโลหะแนวเชื่อมลวดเชื่อมจะถูกป้อนออกจากม้วนลวดเชื่อมด้วยระบบอัตโนมัติการเชื่อมสามารถทำได้ทั้งด้วยมือและเครื่อง [20]

2.3 การเชื่อมชั้นรองพื้น (Buffer Layer Welding) [21]

การเชื่อมชั้นรองพื้น คือ เป็นตัวกลางประสานระหว่างโลหะชิ้นงาน (Base Metal) กับชั้นเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing Layers) ทำให้โลหะชิ้นงานและโลหะเชื่อมยึดติดกันได้ดีและเพื่อป้องกันหลีกเลี่ยงการเกิดรอยแตกร้าวของไฮโดรเจนใต้แนวเชื่อมในชิ้นงานที่ไม่ได้มีการอุ่นชิ้นงาน (Preheated) และลดผลกระทบการเกิดความเครียดในชิ้นงานเชื่อมและป้องกันการผลกระทบของการเงิอจางของส่วนผสมทางเคมีและป้องกันการเชื่อมไม่ติดระหว่างชั้นพอกผิวแข็งกับโลหะชิ้นงาน และป้องกันไม่ให้เกิดรอยแตกร้าวของชั้นพอกผิวแข็งเข้าไปสู่ชั้นโลหะชิ้นงาน

2.4 การเชื่อมพอกผิวแข็ง [22]

การตกแต่งโลหะเป็นวิธีการพิเศษวิธีหนึ่ง ซึ่งทำได้โดยใช้วัสดุโลหะชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน เคลือบบนผิวของชิ้นงานที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น เคลือบโลหะ โลหะผสม เซรามิก พลาสติก การเคลือบผิว อาจเป็นลักษณะผิวงานไม่หลอมละลายรวมกับโลหะซึ่งนำไปเคลือบ (Adhesion) เช่น การชุบสังกะสี ชุบเงิน และอาบดีบุก หรือผิวโลหะชิ้นงานหลอมละลายรวมกับโลหะซึ่งนำมาเคลือบติด (Cohesion) โลหะผสมมักถูกนำมาเคลือบกับชิ้นงานด้วย

กรรมวิธีการพอกผิวโลหะนั้นเป็นวิธีทำให้โลหะซึ่งนำมาพอกนั้นหลอมละลายติดกับผิวของโลหะชิ้นงานเมื่อทำการพอกผิวและได้ความแข็ง กรรมวิธีชนิดนี้เรียกว่า “การพอกผิวแข็ง” (Hard Surfacing)

กรรมวิธีพอกผิวแข็งเริ่มใช้มานานหลายปีแม้ว่าได้จดลิขสิทธิ์ตั้งแต่ในปี ค.ศ.1896 ก็ตาม ในปี ค.ศ.1920 ได้นำเอากรรมวิธีนี้มาใช้ในอุตสาหกรรมเจาะน้ำมันโดยพอกผิวแข็งหัวเจาะน้ำมัน เพื่อให้

หัวเจาะนั้นสามารถเจาะผ่านชั้นหินแข็งได้ ต่อมาในปีค.ศ.1930 ได้นำกรรมวิธีนี้มาใช้พอกผิวอุปกรณ์ ซึ่งต้องรองรับการเสียดสีในกิจการรถไฟปัจจุบันอุปกรณ์ต่างๆราคาสูงขึ้นนักอุตสาหกรรมหรือเจ้าของโรงงานส่วนใหญ่มีความสนใจวิธีพอกผิวแข็งเพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์

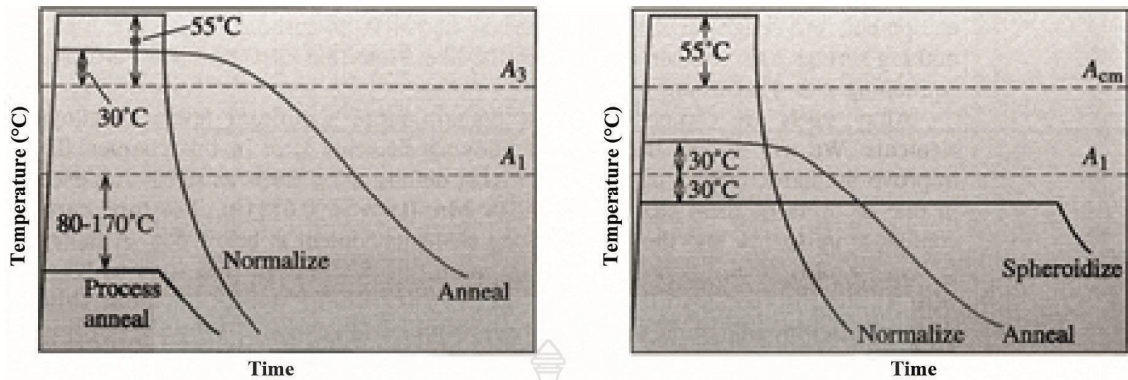
หลักการพอกผิวโลหะ การทำให้เกิดชั้นโลหะผสมอย่างถูกต้องบนผิวของโลหะชิ้นงาน เพื่อให้ชิ้นงานนั้นคงทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี ทนจากการสึกหรอจากการเสียดสีซึ่งอาจเกิดจากโลหะด้วยกัน หรือโลหะชิ้นงานกับวัสดุอื่น ตลอดจนทนต่อการแตกร้าวหรือแตกหักเหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสม ส่วนมากสามารถพอกผิวแข็งได้ เว้นแต่เหล็กกล้าผสมวานาเดียมสูง และเหล็กไฮสปีด (High Vanadium Steels And High Speed Tool Steels)

ประโยชน์จากการพอกผิวโลหะด้วยโลหะผสม

- ชิ้นงานจะมีขนาดคงเดิมตามสภาพงานซึ่งมีการเสียดสี การกัดกร่อน หรือ การกระแทก
- ยืดอายุการใช้งานอุปกรณ์นั้นให้ยาวขึ้น
- ลดต้นทุนการผลิตได้ เพราะสามารถใช้โลหะผสมต่ำราคาไม่แพงทำชิ้นส่วนอุปกรณ์และพอกด้วยโลหะผสมราคาแพงบริเวณที่ต้องการ สภาพการกัดกร่อนผิวโลหะในการผลิตเคมีภัณฑ์ผิวโลหะชนิดโลหะผสมต่ำจะต้องสัมผัสแก๊สหรือของไหลซึ่งเป็นตัวกัดกร่อนผิวโลหะของอุปกรณ์ผลิตชนิดนี้ ควรเป็นเหล็กสเตนเลสจึงทนต่อปฏิกิริยากัดกร่อนได้ยืดอายุการใช้งานออกไปอีกเป็นการลดต้นทุนการผลิตอุปกรณ์เมื่อเทียบกับการทำอุปกรณ์จากสเตนเลสทั้งหมด ลดต้นทุนและปัญหาในการจัดเก็บอุปกรณ์อะไหล่ เพราะอุปกรณ์หรืออะไหล่มีอายุการใช้งานยืนยาว

2.5 การอบชุบ

กระบวนการอบชุบเหล็กกล้าแสดงไว้ดังรูปที่ 2.3 ประกอบไปด้วยการอบอ่อนเพื่อคลายความเครียดจากการขึ้นรูป (Process annealing) การอบอ่อน (Annealing) การอบให้เกรนสม่ำเสมอ (Normalizing) และการอบให้เกรนมีความกลมมน (Spheroidizing) กระบวนการเหล่านี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการคลายความเครียด ควบคุมและปรับการกระจายตัวของเฟส เพื่อให้สมบัติทางกลของเหล็กกล้าเปลี่ยนแปลง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ก) Hypoeutectoid

ข) Hypereutectoid

รูปที่ 2.3 แผนภาพสรุปรูปแบบของการอบชุบสำหรับ (ก) เหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอย และ (ข) เหล็กกล้าไฮเพอร์ยูเทคตอย

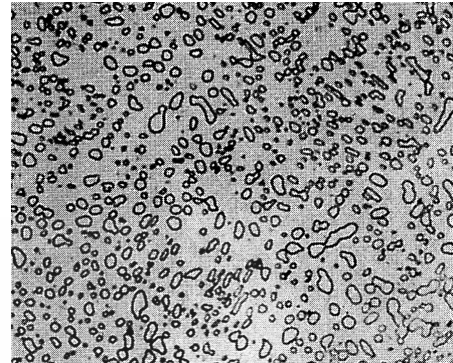
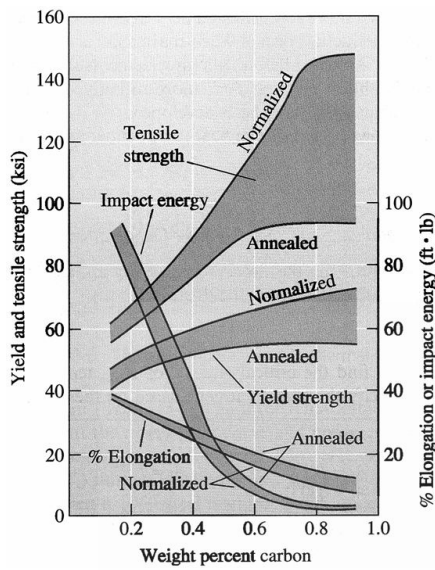
1) การอบอ่อนเพื่อคลายความเครียดจากการขึ้นรูป (Process annealing) คือ การอบชุบเพื่อให้เกิดผลึกใหม่ (Recrystallization heat treatment) ในโครงสร้างเดิมของเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.25% เพื่อกำจัดความเครียดที่เกิดจากการขึ้นรูปต่างๆ เช่น การรีดเย็น โดยทำการอบเหล็กกล้าไปที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้นอุณหภูมิ A_1 ประมาณ 80-170°C อบแช่ที่ระยะเวลาที่กำหนด และปล่อยให้เย็นตัวในเตา

2) การอบอ่อน (Annealing) และการอบให้เกรนสม่ำเสมอ (Normalizing) มีขั้นตอน คือ นำเหล็กกล้าไปทำการอบให้ความร้อนเพื่อทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์ (Austenizing) ทั้งหมด จากนั้นหากต้องการทำการอบอ่อนทำได้โดยการปล่อยให้เหล็กที่อบเป็นออสเทนไนต์แล้วเย็นตัวอย่างช้าๆ ในเตา ผลของการเย็นตัวช้าๆ ในเตานี้ทำให้เฟลิลไลท์ที่ได้มีความหยาบหรือขนาดโต และส่งผลทำให้ง่ายต่อการนำไปขึ้นรูปทางกลต่อไป หรือถ้าต้องการอบให้เกรนสม่ำเสมอทำได้โดยนำเหล็กที่อบเป็นออสเทนไนต์มาทำให้เย็นตัวในอากาศนอกเตา อัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าจะทำให้เฟลิลไลท์มีความละเอียดและส่งผลทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอนแตกต่างกันที่ผ่านการอบอ่อนและการอบให้เกรนสม่ำเสมอแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบอ่อน คือ อุณหภูมิสูงกว่าเส้น A_3 ประมาณ 30°C สำหรับการทำให้เหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยเปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด แต่สำหรับเหล็กกล้าไฮเพอร์ยูเทคตอย อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเปลี่ยนเหล็กกล้าไฮเพอร์ยูเทคตอยเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมดอยู่ที่อุณหภูมิสูงกว่าเส้น A_1 ประมาณ 30°C เนื่องจากอุณหภูมินี้ป้องกันการเกิดการก่อตัวของซีเมนไตต์ที่มีความยาวต่อเนื่องและเปราะที่ขอบเกรนของเฟลิลไลท์ ซึ่งโดยปกติเป็นเฟสที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเย็นตัวอย่างช้าๆ จากนั้นในขั้นตอนต่อไปเหล็กกล้าทั้งสองถูกทำให้เย็นตัวช้าๆ ในเตา หรือปล่อยให้เย็นตัวในเตาจนกระทั่ง

อุณหภูมิลดลงมาสู่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงต่ำ ยึดตัวได้ดี และง่ายต่อการนำไปขึ้นรูปทางกลต่อไป ขณะที่ในการอบให้เกรนสม่ำเสมอ อุณหภูมิการทำให้เกิดอสเทนไนท์ทั้งหมดของเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยและเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยอยู่ที่ประมาณ 55°C สูงกว่าเส้น A_3 และ A_{cm} ตามลำดับ ในการเย็นตัวของชิ้นงาน เหล็กกล้าถูกนำออกมาจากเตา และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ อัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าทำให้ได้เฟอไลต์ที่มีความละเอียด และมีความแข็งแรงที่สูงกว่า

3) การอบให้เฟสมีความกลมมน (Spheroidizing) เป็นการเพิ่มความสามารถในการแปรรูปทางกล (Machineability) เช่น การกลึง กัด ตัด ไส หรือขึ้นรูป ของเหล็กกล้า เหล็กกล้าที่มีปริมาณเฟสของซีเมนไตต์สูงจะมีความสามารถในการแปรรูปต่ำ เนื่องจากโดยทั่วไปเฟสซีเมนไตต์เป็นเฟสที่มีการเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ มีรูปร่างที่ไม่กลม ไม่สมมาตร และส่งผลทำให้มีความแข็งแรงสูง หากเฟสซีเมนไตต์ที่มีความกลมมนเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการแปรรูปของเหล็กกล้าเพิ่มขึ้นการทำให้เฟสที่กระจายตัวในเหล็กกล้ามีความกลมมนเพิ่มมากขึ้นทำได้โดยการอบให้ความร้อนชิ้นงานไปที่อุณหภูมิช่วงต่ำกว่าเส้น A_1 ประมาณ 30°C ในช่วงระยะเวลาที่ยาวนานเพียงพอ ทำให้ซีเมนไตต์เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเฟสให้มีความกลมมนเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างเฟสที่มีความกลมมนที่ได้นี้เรียกว่า “สเฟียร์รอยไตต์ (Spheroidite)” ความกลมมนของเฟสซีเมนไตต์ทำให้พื้นหลักของเหล็กกล้ามีความต่อเนื่องเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.4 และส่งผลทำให้ง่ายต่อการแปรรูปต่อไป

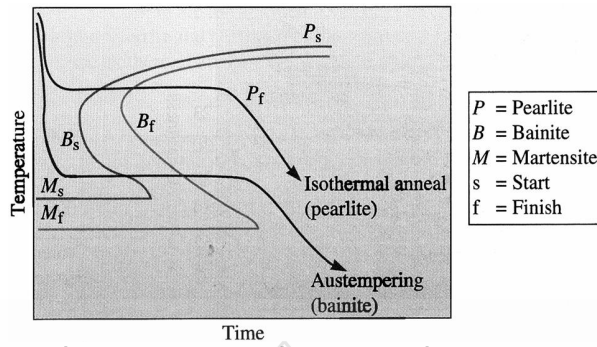
4) การอบให้เฟสมีความกลมมน (Spheroidizing) เป็นการเพิ่มความสามารถในการแปรรูปทางกล (Machineability) เช่น การกลึง กัด ตัด ไส หรือขึ้นรูป ของเหล็กกล้า เหล็กกล้าที่มีปริมาณเฟสของซีเมนไตต์สูงจะมีความสามารถในการแปรรูปต่ำ เนื่องจากโดยทั่วไปเฟสซีเมนไตต์เป็นเฟสที่มีการเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ มีรูปร่างที่ไม่กลม ไม่สมมาตร และส่งผลทำให้มีความแข็งแรงสูง หากเฟสซีเมนไตต์ที่มีความกลมมนเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการแปรรูปของเหล็กกล้าเพิ่มขึ้นการทำให้เฟสที่กระจายตัวในเหล็กกล้ามีความกลมมนเพิ่มมากขึ้นทำได้โดยการอบให้ความร้อนชิ้นงานไปที่อุณหภูมิช่วงต่ำกว่าเส้น A_1 ประมาณ 30°C ในช่วงระยะเวลาที่ยาวนานเพียงพอ ทำให้ซีเมนไตต์เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเฟสให้มีความกลมมนเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างเฟสที่มีความกลมมนที่ได้นี้เรียกว่า “สเฟียร์รอยไตต์ (Spheroidite)” ความกลมมนของเฟสซีเมนไตต์ทำให้พื้นหลักเหล็กกล้าต่อเนื่องเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.4 และส่งผลทำให้ง่ายต่อการแปรรูปต่อไป



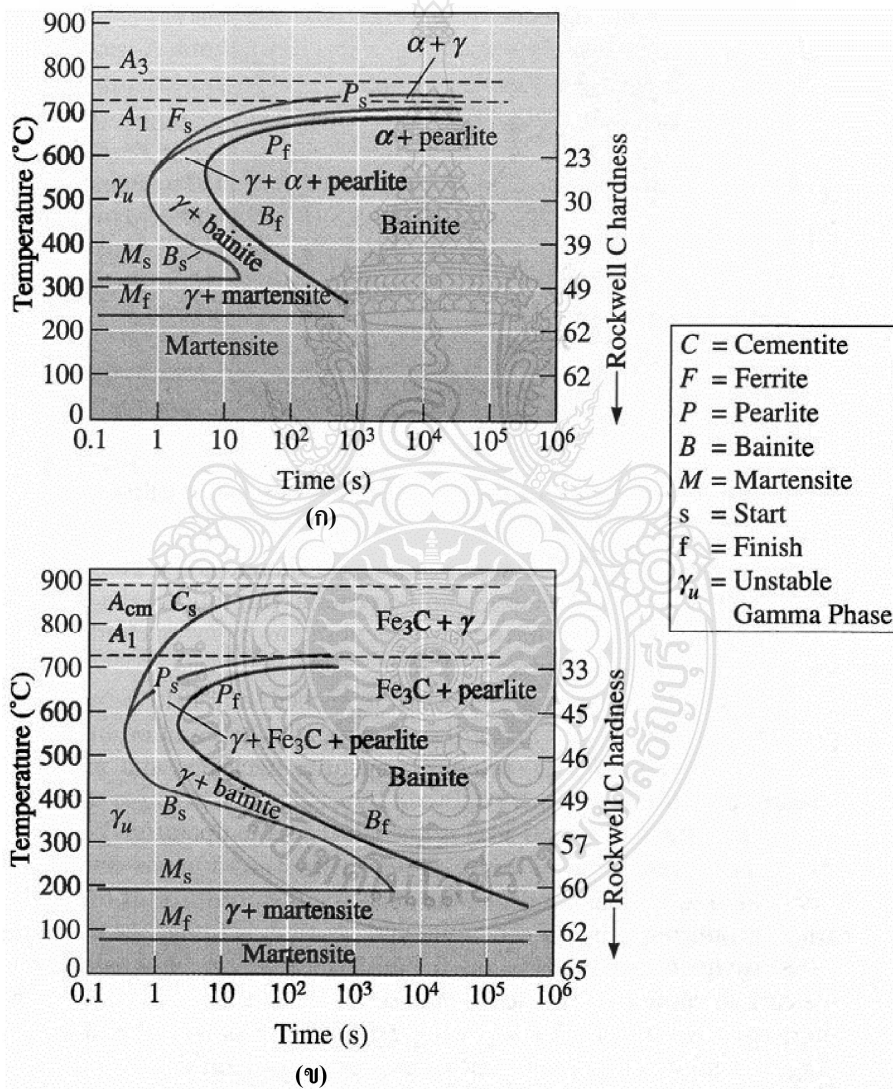
รูปที่ 2.4 อิทธิพลของคาร์บอนและการอบชุบต่อสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน [16]

รูปที่ 2.5 โครงสร้างซีเมนต์ไคท์กลมมนในพื้นหลักเฟอไรท์ กำลังขยาย 850 เท่า [16]

5) การอบอสเทมเปอริงหรือการอบอ่อนที่อุณหภูมิคงที่ (Austempering or isothermal annealing) คือ การอบชุบเพื่อให้ได้โครงสร้างเบนไนท์ ทำได้โดยการอบเหล็กกล้าให้เปลี่ยนโครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ทั้งหมด จากนั้นทำให้เหล็กกล้าเย็นตัวที่อัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าจุมกของแผนภูมิ TTT ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จุ่มแช่ที่อุณหภูมินั้น เพื่อให้ออสเทนไนท์เกิดการเปลี่ยนแปลงผ่านเส้นเริ่มต้นเปลี่ยนเป็นเบนไนท์จนกระทั่งถึงเส้นสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงเป็นเบนไนท์ จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวสู่อุณหภูมิห้อง ขณะที่การอบอ่อนที่อุณหภูมิคงที่ทำได้โดยการอบเหล็กกล้าให้เปลี่ยนโครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ทั้งหมด และปล่อยให้เหล็กกล้าเย็นตัวที่อัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าจุมกของแผนภูมิ TTT ดังแสดงในรูปที่ 2.6 จุ่มแช่ที่อุณหภูมินั้นจนกระทั่งออสเทนไนท์สิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงที่เส้นสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงเป็นเฟลไลต์ ทำให้ได้โครงสร้างเฟลไลต์ที่มีขนาดใหญ่ หยาบ และกลมมน มีสมบัติที่สม่ำเสมอมากขึ้น

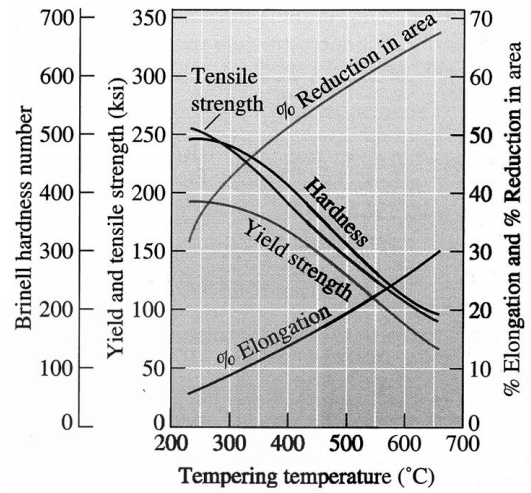
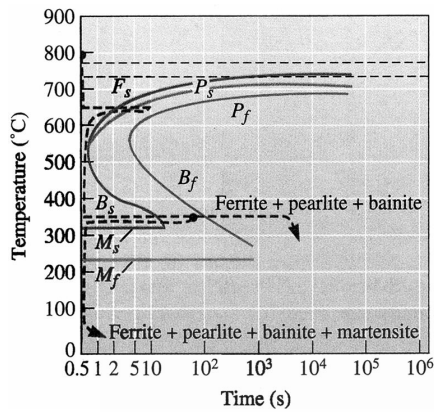


รูปที่ 2.6 การทำอสเทมเปอริงและการอบอ่อนที่อุณหภูมิคงที่ในเหล็กกล้า 1080 [16]

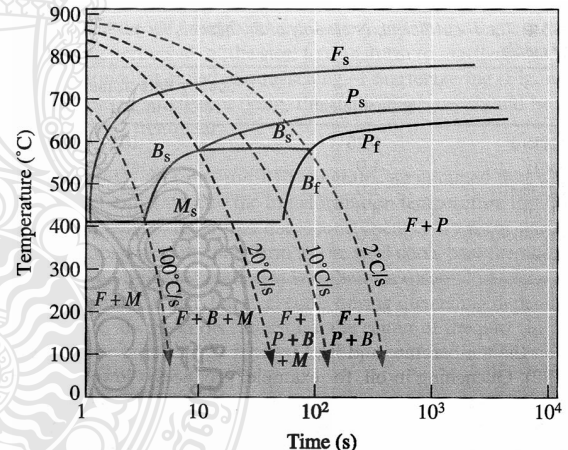
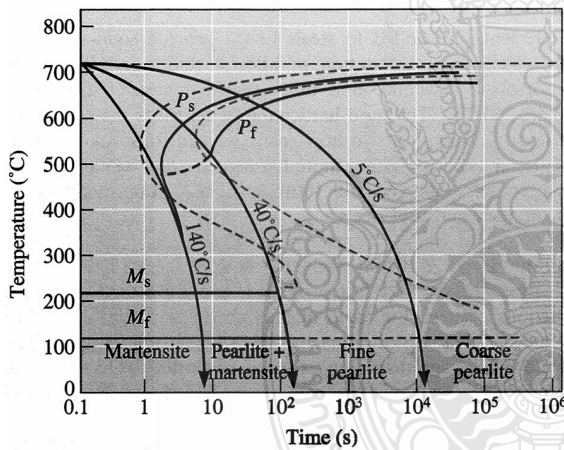


รูปที่ 2.7 แผนภูมิ TTT ของ (ก) เหล็กกล้า 1050 และ (ข) เหล็กกล้า 10110 (γ_u หมายถึงอสเทนไนต์ที่ไม่เสถียร และพร้อมในการเปลี่ยนแปลง) [16]

6) อิทธิพลของการคาร์บอนต่อแผนภาพ TTT (Effect of changes in carbon concentration on the TTT diagram) รูปที่ 2.7 แสดงแผนภูมิ TTT ของเหล็กกล้า 1050 และ 10110 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำและสูงตามลำดับ ที่บริเวณอุณหภูมิสูงกว่าจุมกของแผนภูมิ TTT มีเส้นการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น คือ เส้น F_s และ C_s สำหรับเหล็กกล้า 1050 และ 10110 ตามลำดับ ในเหล็กกล้า 1050 เส้น F_s เป็นตัวบอกให้ทราบว่าหากเหล็กกล้า 1050 มีอัตราการเย็นตัวที่ช้าและลากผ่านเส้นนี้ เฟอไรต์จะก่อตัวขึ้นและเติบโตเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาผ่านไปนานขึ้น เฟอไรต์ที่ก่อตัวนี้จะสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงที่เส้น P_s พื้นที่ระหว่างเส้น F_s และ P_s นี้จึงประกอบไปด้วยเฟอไรต์และออสเทนไนต์ เมื่อเหล็กกล้า 1050 เย็นตัวต่อไปผ่านเส้น P_s ออสเทนไนต์ที่หลงเหลืออยู่ก็จะเกิดการแตกตัวเป็นเฟลไลต์ต่อไป โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายของเหล็กกล้า 1050 ที่เย็นตัวผ่านเส้น F_s , P_s และ P_f จึงประกอบไปด้วย เฟอไรต์และเฟลไลต์ เช่นเดียวกับในเหล็กกล้า 10110 เส้น C_s คือเส้นที่ซีเมนไตท์ก่อตัวขึ้น และเติบโตเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาผ่านไปนานขึ้น ซีเมนไตท์ที่ก่อตัวนี้จะสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงที่เส้น P_s พื้นที่ระหว่างเส้น C_s และ P_s นี้จึงประกอบไปด้วย ซีเมนไตท์และออสเทนไนต์ เมื่อเหล็กกล้าเย็นตัวต่อไปผ่านเส้น P_s ออสเทนไนต์ที่หลงเหลืออยู่ก็จะเกิดการแตกตัวเป็นเฟลไลต์ โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายจึงประกอบไปด้วย ซีเมนไตท์และเฟลไลต์ ถ้าจุ่มชุบเหล็กกล้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุมกของแผนภูมิ TTT โครงสร้างที่เกิดขึ้นของเหล็กกล้าทั้งสอง คือ เบนไนต์ และหากทำให้เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าเส้น M_s โครงสร้างที่เกิดขึ้น คือ มาเทนไซต์ การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิคงที่แบบไม่ต่อเนื่อง (Effect of changes in carbon concentration on the TTT diagram) การอบชุบที่ทำให้อุณหภูมิไม่คงที่ทำได้โครงสร้างของเหล็กกล้าที่ซับซ้อน เช่น ตัวอย่างการอบชุบเหล็กกล้า 1050 ในรูปที่ 2.8 ที่ทำการอบให้ความร้อนแก่เหล็กที่อุณหภูมิ 800°C และจุ่มชุบมาที่อุณหภูมิ 650°C แช่ที่อุณหภูมินี้ 10 วินาที เพื่อให้เฟอไรต์และเฟลไลต์ก่อตัวขึ้น หลังจากนั้นจุ่มชุบมาที่อุณหภูมิ 350°C จุ่มแช่ที่อุณหภูมินี้ 1 ชั่วโมง หรือ 3600 วินาที ด้วยวิธีการนี้ออสเทนไนต์ที่หลงเหลืออยู่ก่อนการลดอุณหภูมิมาที่ 350°C จะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็น เบนไนต์ โครงสร้างสุดท้ายจึงประกอบด้วยเฟอไรต์ เฟลไลต์ และเบนไนต์ หรือหากต้องการทำให้เกิดมาเทนไซต์ก็สามารถทำได้โดยการจุ่มแช่ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 1 min จากนั้นจุ่มชุบลงมาที่อุณหภูมิห้องซึ่งจะทำให้โครงสร้างสุดท้ายประกอบด้วยเฟอไรต์ เฟลไลต์ และมาเทนไซต์



รูปที่ 2.8 แผนภูมิ TTT สำหรับเหล็กกล้า 1050 รูปที่ 2.9 ผลของอุณหภูมิการอบคืนไฟต่อสมบัติ และเหล็กกล้า 10110 [16] ทางกลเหล็กกล้า 1050 [16]



รูปที่ 2.10 แผนภูมิ CCT (เส้นที่บ) ของเหล็กกล้า 1080 เปรียบเทียบกับแผนภูมิ TTT (เส้นประ) [16] รูปที่ 2.11 แผนภูมิ CCT ของเหล็กกล้าผสมต่ำ 0.2%C [16]

7) การชุบแข็งและการอบคืนไฟ (Quench and temper heat treatment) การชุบแข็ง คือ การทำให้เหล็กกล้ามีความแข็งเพิ่มขึ้น ขณะที่การอบคืนไฟ คือ การอบชุบเพื่อให้เหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งมีความเหนียว (Toughness) เพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างของการชุบแข็งและการอบคืนไฟพบได้ในการทำเหล็กกล้าดาเมซัส (Damascus steel) และการทำดาบซามูไร ซึ่งโครงสร้างหลังจากการอบชุบประกอบไปด้วยซีเมนไตท์ที่มีความละเอียดกระจายอยู่ในพื้นหลักเฟอไรต์ (หรือเทมเปอร์มาเทน

ไซท์) โครงสร้างมาเทนไซท์ที่ได้จากการอบชุบเมื่อทำการอบคืนไฟ จะทำให้ของผสมระหว่างซีเมนต์ไคท์และเฟอไรท์ก่อตัวขึ้นในมาเทนไซท์ และทำให้ความแข็งชิ้นงานลดลงแต่มีความเหนียวเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.9

8) การชุบแข็งและการอบคืนไฟ (Quench and temper heat treatment) การชุบแข็ง คือ การทำให้เหล็กกล้ามีความแข็งเพิ่มขึ้น ขณะที่การอบคืนไฟ คือ การอบชุบเพื่อให้เหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งมีความเหนียว (Toughness) เพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างของการชุบแข็งและการอบคืนไฟพบได้ในการทำเหล็กกล้าดามัสกัส (Damascus steel) และการทำดาบซามูไร ซึ่งโครงสร้างหลังจากการอบชุบประกอบไปด้วยซีเมนต์ไคท์ที่มีความละเอียดกระจายอยู่ในพื้นหลักเฟอไรท์ (หรือเทมเปอร์มาเทนไซท์) โครงสร้างมาเทนไซท์ที่ได้จากการอบชุบเมื่อทำการอบคืนไฟ จะทำให้ของผสมระหว่างซีเมนต์ไคท์และเฟอไรท์ก่อตัวขึ้นในมาเทนไซท์ และทำให้ความแข็งชิ้นงานลดลงแต่มีความเหนียวเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.10

แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง (Continuous cooling transformation: CCT) เป็นตัวบอกรัตราการเย็นตัวของเหล็กกล้าจากอุณหภูมิสูงสู่อุณหภูมิต่ำเพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาคตามต้องการ เช่น กราฟ CCT ของเหล็กกล้า 1080 ในรูปที่ 2.10 ที่แสดงอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน ถ้าเหล็กกล้า 1080 เย็นตัวด้วยอัตรา 5°C/s เหล็กกล้าจะเย็นตัวผ่านเส้น P_s และ P_f โครงสร้างสุดท้ายจะประกอบไปด้วยเฟอไรท์ที่มีความโตหยาบ (Coarse pearlite) คล้ายการอบอ่อน หากเหล็กกล้า 1080 เย็นตัวด้วยอัตรา 40°C/s เหล็กกล้าจะเย็นตัวผ่านเส้น P_s และ P_f โครงสร้างประกอบไปด้วยเฟอไรท์ที่มีความละเอียด (Fine pearlite) และมีออสเทนไนท์บางส่วนที่ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง หากออสเทนไนท์นี้เย็นตัวที่อัตราเดิม ออสเทนไนท์จะเกิดการเย็นตัวผ่านเส้น M_s และ M_f และเกิดเป็นโครงสร้างมาเทนไซท์ต่อไปที่อุณหภูมิห้อง หรือเหล็กกล้าเย็นตัวที่อัตราที่มากกว่า 140°C/s ซึ่งเร็วกว่าจุมกของแผนภาพ TTT และลากตัดผ่านเส้น M_s และ M_f ออสเทนไนท์จะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาเทนไซท์โดยสมบูรณ์

รูปที่ 2.11 แสดงแผนภูมิ CCT ของเหล็กกล้าผสมคาร์บอนประมาณ 0.2% ที่แสดงอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกันและโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายที่ได้ พิจารณาแผนภูมิ หากแผนภูมิ CCT ลากผ่านเส้นเริ่มต้นเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างใดๆ โครงสร้างนั้นจะก่อตัวขึ้น เช่น ที่อัตราการเย็นตัว 2°C/s จากอุณหภูมิประมาณ 880°C (เส้นประขวามือสุด) การเย็นตัวของเหล็กกล้าเริ่มจากการเย็นตัวลากผ่านเส้นเริ่มเกิดเฟอไรท์ (F) ผ่านเส้นการเกิดเฟอไรท์ (P_s) ผ่านเส้นสิ้นสุดการเกิดเฟอไรท์

โพลี (P) และสุดท้ายผ่านเส้นสิ้นสุดการเกิดเบนไนท์ (B) ทำให้ได้โครงสร้างสุดท้าย คือ เฟอไรต์ เพลด โพลี และเบนไนท์เช่นเดียวกับการเกิดการเย็นตัวที่อัตรา 1020 หรือ 100°C/s ที่ต้องพิจารณาว่าเส้นการเย็นตัวลากเส้นผ่านเส้นการเปลี่ยนแปลงใดๆ จะทำให้โครงสร้างนั้นก่อตัวขึ้นในเหล็กกล้า

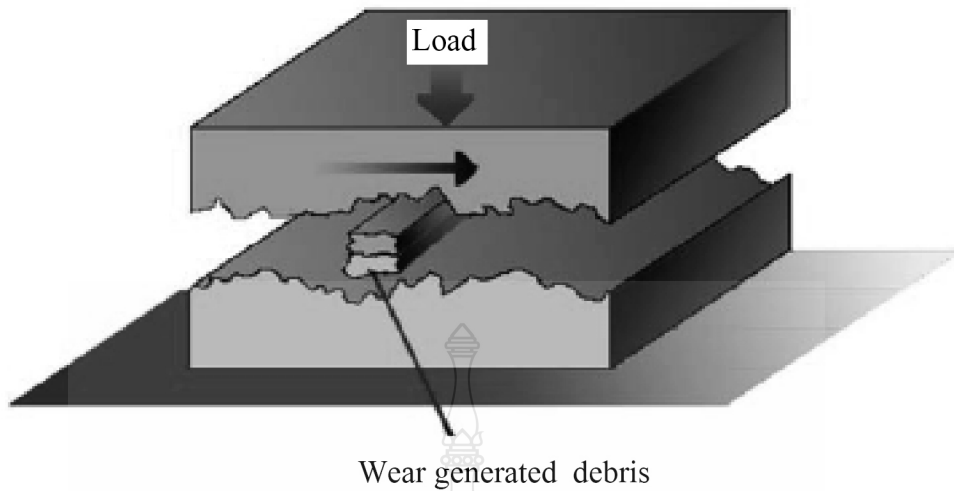
2.6 การสึกหรอ

นิตกร นรภัยพิพากษา [23] ได้อธิบายหลักการของทฤษฎีการสึกหรอในวิทยานิพนธ์ การสึกหรอ (Wear) คือ ความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณผิวเนื่องจากการเคลื่อนที่ระหว่างผิวสัมผัสของมวล และสิ่งแวดล้อม โดยความเสียหายอาจอยู่ในรูปการสูญเสียมวล การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และการเกิดรอยร้าว เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวเคลื่อนที่มาสัมผัสกัน กระทั่งพื้นผิวเกิดความเสียหาย การพิจารณาการสึกหรอจากมวลที่สูญเสียเกิดการหลุดออกของวัสดุกลายเป็นเศษการสึกหรอ (Wear debris) และขนาดของรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปในระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งหากไม่ได้รับการแก้ไขอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายของชิ้นส่วนนั้นในระหว่างการใช้งาน หรืออาจทำให้สูญเสียหน้าที่การทำงานของทั้งระบบอย่างฉับพลัน

2.6.1 กลไกการสึกหรอ

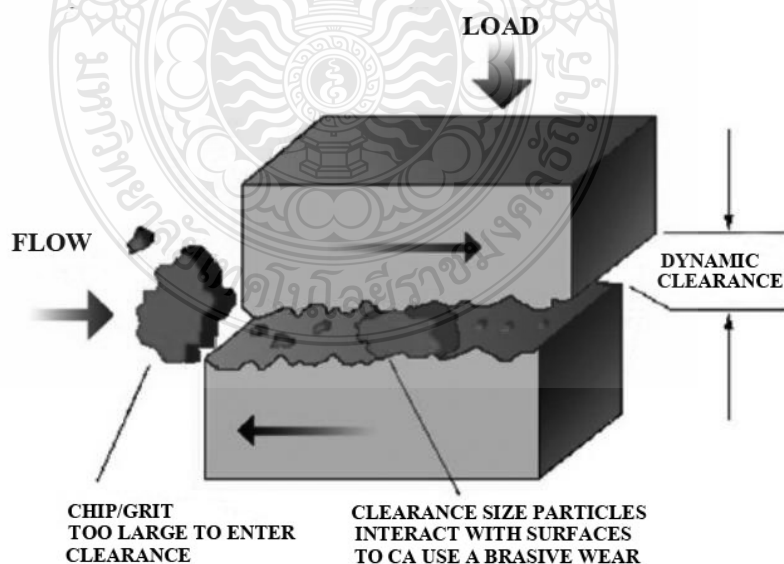
การแบ่งกลไกของการสึกหรอสามารถใช้เปรียบเทียบการสึกหรอประเภทต่างๆ ได้ เพื่ออธิบายกลไกการสึกหรอและเข้าใจการเปลี่ยนรูปแบบการสึกหรอจากประเภทหนึ่งไปเป็นอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งความรู้นี้สามารถใช้ในการออกแบบช่วยลดการสึกหรอและทำนายอายุการใช้งานได้ โดยทั่วไปนิยมแบ่งการสึกหรอตามประเภทของกลไกการสึกหรอ 4 ประเภท ดังนี้

1) การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear) แสดงดังรูปที่ 2.12 เกิดจากการที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสทำให้เกิดการดึงระหว่างผิวสัมผัสเมื่อมีการเคลื่อนที่และส่งผลให้เกิดการสูญเสียมวลหรืออาจเรียกอีกอย่างว่า การสึกหรอจากการไถล (sliding wear) เกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ไถลที่รอยต่อระหว่างหน้าสัมผัส และเกิดแรงดึงส่วนที่ติดแน่นและอ่อนแอกว่าแยกจากกัน เกิดฟิล์มถ่ายโอน (transfer film) ไปสู่อีกพื้นผิวหนึ่ง ทำให้การสึกหรอรูปแบบนี้มีรูปแบบที่รุนแรง เนื่องจากความไม่เสถียรของแรงเสียดทานระหว่างคู่ผิวสัมผัสมีค่าสูง ส่งผลให้อัตราการสึกหรอสูง การสึกหรอแบบแนบติดเป็นพื้นฐานของความเสียหายในโลหะทุกชนิดที่มีการไถล



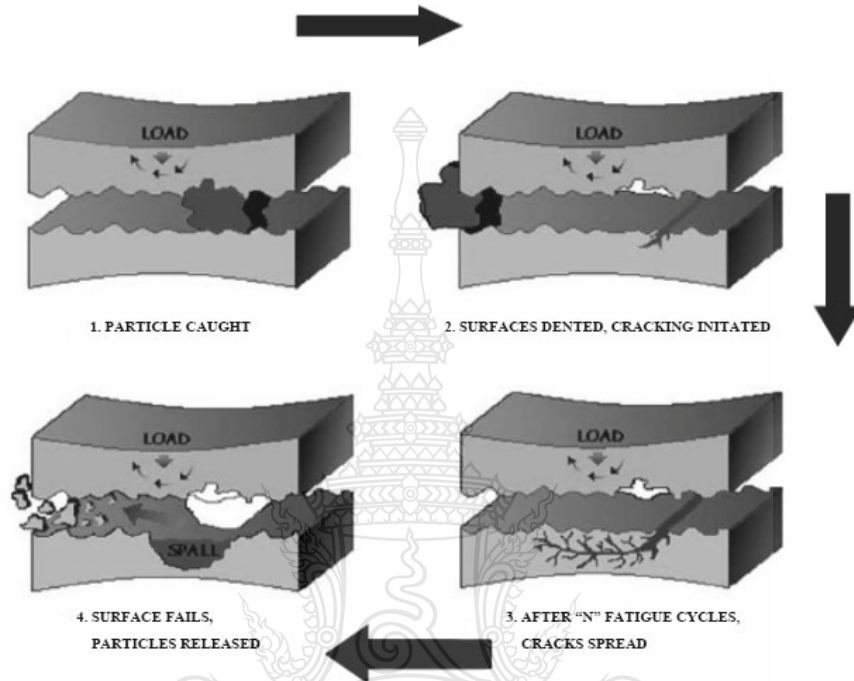
รูปที่ 2.12 การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear) [24]

2) การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) แสดงดังรูปที่ 2.13 เป็นการสึกหรอโดยไม่มีการเชื่อมกันของผิวสัมผัส เกิดได้ 2 ลักษณะ คือ การขัดถูชนิดสองเนื้อ (Two-body abrasive) เกิดจากการที่ผิวแข็งไม่เรียบกดลงบนผิวอ่อน และการขัดถูชนิดสามเนื้อ (Three-body abrasive) เกิดจากเศษวัสดุแข็งที่อยู่ระหว่างผิวสัมผัสขูดขีดผิวสัมผัสระหว่างการเคลื่อนที่ลักษณะความเสียหายปรากฏเป็นร่อง (groove) รอยขีดข่วน (Scratch) รอยกด (Indentation) ที่ผิว ส่งผลให้เกิดการสูญเสียมวล กลไกการสึกหรอแบบขัดถู



รูปที่ 2.13 การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) [24]

3) การสึกหรอแบบการล้า (Fatigue wear) แสดงดังรูปที่ 2.14 เกิดจากการรับภาระซ้ำไป-มาบริเวณผิวสัมผัสส่งผลให้เกิดรอยร้าว การขยายตัวของรอยร้าว การเชื่อมต่อของรอยร้าว การหลุดล่อนของผิว จนเกิดการสูญเสียมวล การสึกหรอลักษณะนี้ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาภาระ และจำนวนครั้งของการเคลื่อนที่กลไกการสึกหรอแบบการล้าที่ผิววัสดุภายใต้สภาวะการเคลื่อนที่ไกล



รูปที่ 2.14 การสึกหรอแบบการล้า (Fatigue wear) [24]

4) การสึกหรอแบบสึกกร่อน (Corrosive or oxidation wears) แสดงดังรูปที่ 2.15 เกิดจากกระบวนการทางเคมีส่งผลให้เกิดวัสดุใหม่ปกคลุมที่ผิว เช่น สนิม หรือชั้นออกไซด์ชั้นต่าง ๆ เมื่อมีการเคลื่อนที่ชั้นออกไซด์จะแตกออกจากการเกี่ยวติดกันของยอดสูงระหว่างผิวสัมผัสส่งผลให้เกิดการสึกหรอ อย่างไรก็ตาม ชั้นออกไซด์จะถูกสร้างขึ้นใหม่ในเวลาต่อมา โดยกระบวนการทางเคมีเป็นตัวกำหนดอัตราการสึกหรอ กลไกการสึกหรอแบบสึกกร่อน

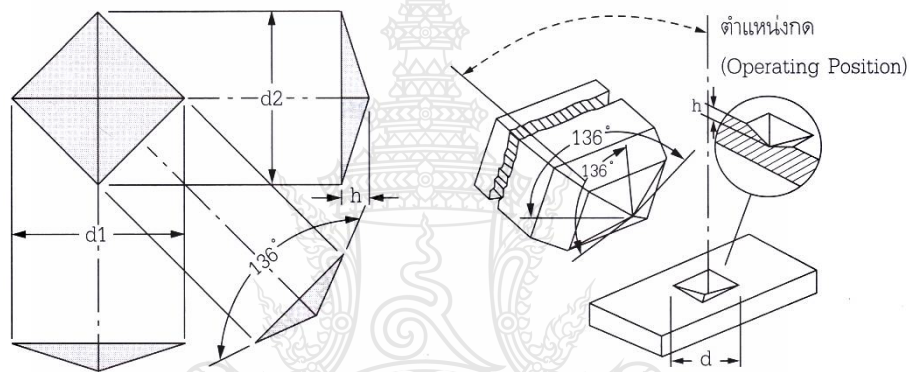


รูปที่ 2.15 การสึกหรอแบบสึกกร่อน (Corrosive or oxidation wears) [24]

2.7 การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อม

2.7.1 การทดสอบความแข็ง

ชูชาติ ศิวังสงค์ [25] ได้เขียนบรรยายอธิบายหลักการ คำว่า ความแข็งจุลภาค (Micro-Hardness) เป็นขนาดของรอยกดที่เกิดขึ้นจากการทดสอบขนาดเล็กมากในการทดสอบความแข็งจุลภาคทั่วไปใช้แรงกดที่ 1 กรัมแรง (gmf) ถึง 2 กิโลกรัมแรง หรือไม่เกิน 1 กิโลกรัมแรง โดยทำการขนาดรอยกดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย ตั้งแต่ 100 เท่า ถึง 500 เท่า เป็นต้น การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส คือ หัวกดทดสอบเป็นรูปทรงพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมมีมุมแหลม 136° โดยทดสอบกดลงบนผิวของวัสดุใช้แรงกดทดสอบตั้งแต่ 1 กรัม ถึง 2 กิโลกรัม (kgf) และทำการวัดขนาดของรอยกดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่มีกำลังขยายตั้งแต่ 100 เท่า ถึง 500 เท่า แสดงดังรูปที่ 2.16

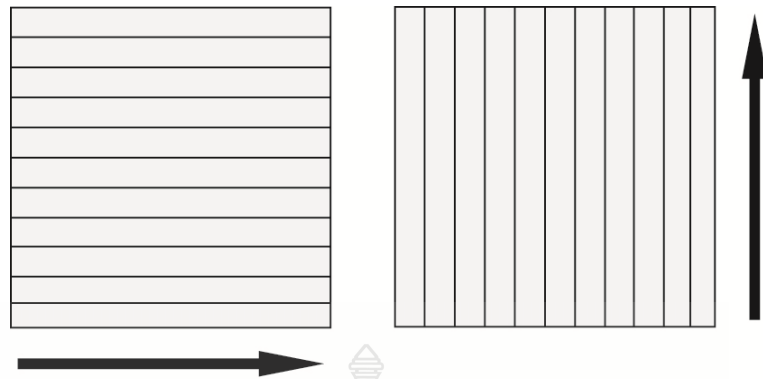


รูปที่ 2.16 ลักษณะหัวกดทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส [25]

2.8 การตรวจสอบทางโลหะวิทยา

2.8.1 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบนั้นควรตัดให้เกิดพื้นที่หน้าตัด และการตัดดังกล่าวต้องหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ก็เพราะความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าตัดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้การตรวจสอบนั้นเกิดการผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ขนาดของชิ้นงานตรวจสอบควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 มม. หรือ 1 นิ้ว และความสูงไม่น้อยกว่า 15 มม. ทำการกลึงปาดหน้าผิวหน้าให้มีความสม่ำเสมอและเป็นระนาบเดียวกัน แสดงทิศทางและวิธีการตัดกระดาษโดยทำการตัดกระดาษไปในทิศทางแนวเดียวกันจากนั้นทำการขีดขวางตั้งฉากกับรอยขีดกระดาษทรายรอยเดิม แสดงดังในรูปที่ 2.17 และทำการกัดกรดตามตารางที่ 2.3

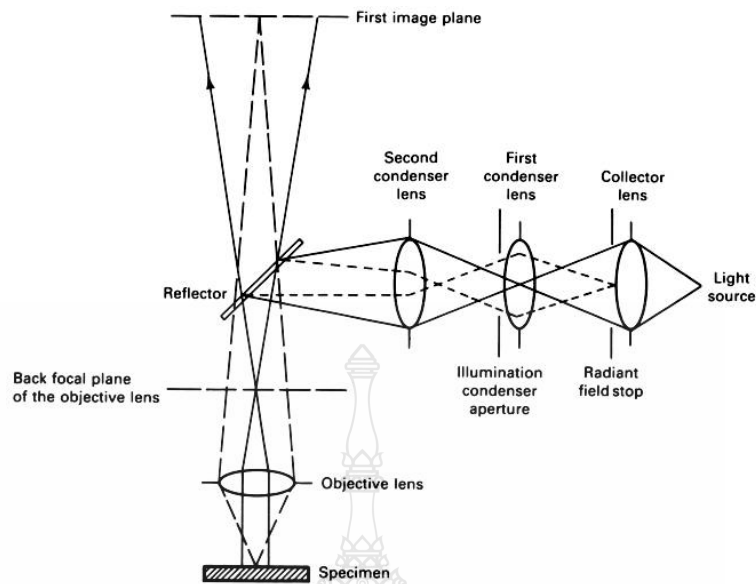


รูปที่ 2.17 ทิศทางการขัดกระดาษทราย

ตารางที่ 2.3 น้ำยาคัดขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E304 [26]

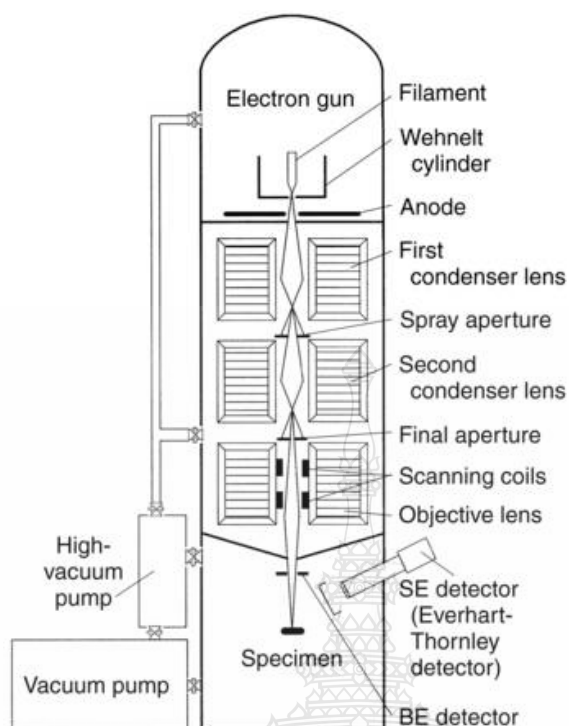
น้ำยาคัดผิวชิ้นงานทดสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
กรดไนตริกและไฮโดรคลอริก (Nitric acid and Hydrochloric)	กรดไนตริก (HNO ₃) 3 มิลลิลิตร, ไฮโดรคลอริก (HCl) 10 มิลลิลิตร และ เมทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร	เหล็กกล้าคาร์บอน	จุ่มขึ้น ตรวจสอบนาน 10-30 วินาที

2.8.2 กล้องจุลทรรศน์สำหรับงานทางโลหะวิทยา (Metallurgical microscope) [19] หรือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) โดยจะมีกำลังขยายอยู่ระหว่าง 10-1,000 เท่า ที่กำลังขยายสูงช่วยทำให้การจำแนกชนิดของเฟส (Phase) โครงสร้าง (Structure) ที่ปรากฏอยู่รวมถึงลักษณะรูปร่าง และขนาดของเฟส หรือ โครงสร้างนั้นๆ การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง แสดงส่วนประกอบด้วยดังในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง [27]

2.8.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning electron microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการตรวจสอบ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนนี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ หลักการทำงาน ประกอบด้วยแหล่งกำเนิด อิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษาหลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกรดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอตทัศน์ได้เลย แสดงส่วนประกอบด้วยดังในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [27]

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ghaini *et al.* [7] ศึกษาการเกิดการแตกร้าว (Crack) ภายใต้ผิวพอกแข็งเหล็กหล่อเหนียวที่เกิดจากการเชื่อมอาร์กลดหุ้มฟลักซ์และใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมหลัก คือ นิกเกิล รอยเชื่อมที่ได้เมื่อนำไปทำการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคพบว่าความยาวของรอยแตกร้าวสัมพันธ์โดยตรงต่อความสูงของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้น หากอัตราการเย็นตัวสูงการทดลองสามารถตรวจสอบพบรอยแตกร้าวเกิดขึ้นได้ที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) รอยแตกร้าวที่เกิดได้แนวเชื่อมนี้ยากต่อการตรวจสอบและมีรูปร่างแตกต่างจากการแตกร้าวเนื่องจากการเย็นตัว นอกจากนี้พบว่ากราฟไฟท์ก่อนกลมในเนื้อเหล็กหล่อเป็นจุดกำเนิดในการแตกร้าว

Liu *et al.* [11] ทำการศึกษาการพอกผิวแข็งเหล็กกล้าด้วยการเชื่อมอาร์กลดหุ้ม ฟลักซ์โดยการเชื่อมทับแนวรวม 4 ชั้น ด้วยตัวแปรการเชื่อมต่างๆ ที่กำหนด ชิ้นงานเชื่อมที่ได้ถูกนำไปทำการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และอัตราการสึกกร่อน ผลการทดลองพบว่า เมื่อโบรอนเพิ่มขึ้นจาก 0-1.4 wt% ในโลหะพอกผิวแข็ง Fe-15Cr-2.5Ti-2C-x(0-1.4) B wt% ส่งผลทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์ไบด์เพิ่มจาก 9-20 ไมโครเมตร และสัดส่วนของปริมาณคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นจาก 14.10-36.00% ความแข็งของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อโบรอนเพิ่มขึ้นสู่ 0.99 wt% และลดลง

เล็กน้อยเมื่อปริมาณ โบรอนเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งสูงของผิวพอกแข็งสูงที่เกิดจากการเติม โบรอนลงใน โลหะพอกผิวแข็งทำให้อัตราการสึกกร่อนของผิวพอกแข็งมีค่าต่ำ

Buchely *et al.* [14] ทำการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็งเหล็กกล้า ASTM A36 แบบไม่มีชั้นรองผิว จำนวน 3 ชั้น ด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ 3 ชนิด และทำการตรวจสอบสมบัติของ รอยเชื่อม คือ การทดสอบความแข็ง การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และการทดสอบความต้านทาน การสึกกร่อนตาม ASTM G65 ผลการทดลองพบว่า ลวดเชื่อมที่มีทั้งสะเตนปริมาณสูงแสดงความ ต้านทานการสึกกร่อนสูงสุดที่การเชื่อมเพียง 1 ชั้น เนื่องจากการรวมตัวที่ดีและการเกิดเฟส M_6C ที่ แข็งในพื้นที่หลัก โครงสร้างยูเทคติก เฟส M_7C_3 คือเฟสที่เป็นตัวยับยั้งการเกิดการสึกกร่อน



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยการเชื่อมอาร์กทวดไส้ฟลักซ์พอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C แล้วนำชิ้นงานที่เชื่อมปรับปรุงด้วยความร้อน คือ การชุบแข็ง การอบคืนไฟ และการอบอ่อน ทดสอบเปรียบเทียบสมบัติทางกลและตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา มีขั้นตอนในการดำเนินการดังนี้

3.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย

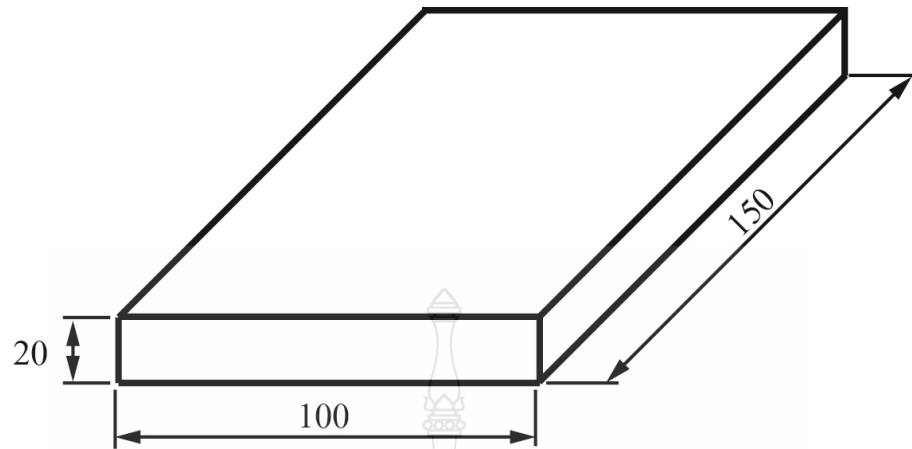
วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C โดยมีส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลแสดงในตารางที่ 3.1 มีขนาดความกว้าง 100 mm ความยาว 150 mm และมีความหนา 20 mm ตามมาตรฐานชิ้นงานเชื่อม JIS Z 3114 แสดงดังในรูปที่ 3.1 ชิ้นงานเชื่อมถูกออกแบบการเชื่อมแบบรองพื้นดังแสดงในรูปที่ 3.3 และไม่รองพื้นดังแสดงในรูปที่ 3.4 และทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง 1, 2 และ 3 ชั้น ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทวดไส้ฟลักซ์โดยแนวเชื่อมพอกผิวแข็งทั้งหมดมีความกว้าง 50 mm ยาว 100 mm ตามมาตรฐาน JIS Z3114 แสดงดังในรูปที่ 3.4 ทวดเชื่อมที่ใช้ คือ ทวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ตามมาตรฐาน DIN 8555 : MF-6-GF-60-GP ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 mm และทวดเชื่อมรองพื้น MIG-70S มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 mm ใช้เชื่อมรองพื้นก่อนการเชื่อมพอกผิวแข็ง โดยมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเชื่อม JIS S50C (โดยน้ำหนัก)

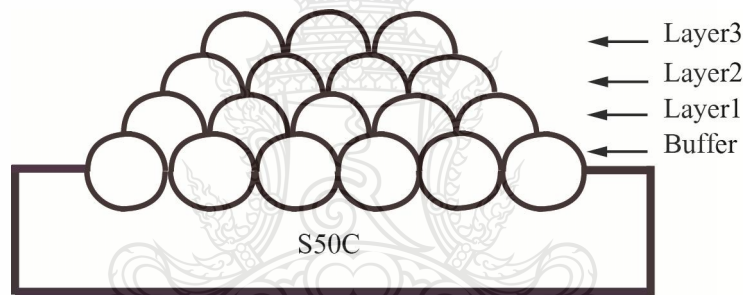
Material	ส่วนผสมทางเคมี (%)				
	C	Si	Mn	P	S
JIS S50C	0.52	0.25	0.80	0.04	0.01

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของทวดเชื่อมพอกผิวแข็ง

Material	ส่วนผสมทางเคมี (%)							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V
MF-6-GF-60-GP	0.51	1.825	0.687	0.012	0.002	7.017	0.369	0.321
MIG-70S	0.06-0.15	1.40-1.85	0.80-1.15	<0.035	<0.025			



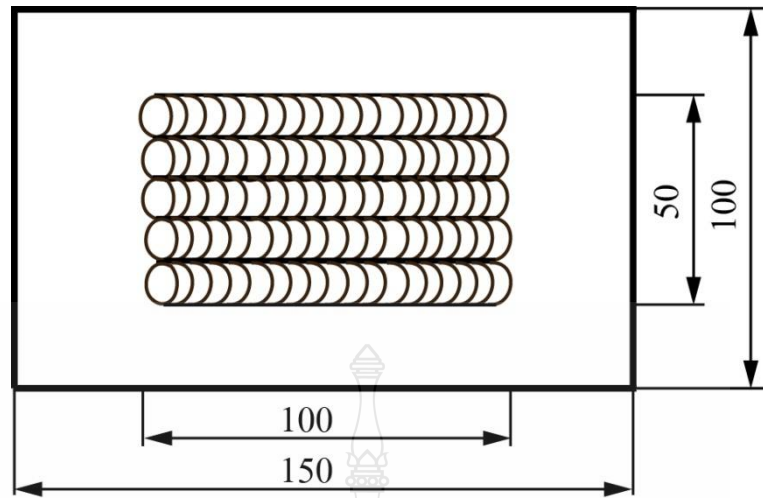
รูปที่ 3.1 ชิ้นงานมีขนาดอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS Z3114 (หน่วย : mm)



รูปที่ 3.2 การเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น แบบรองพื้นด้วยลวด MIG-70S



รูปที่ 3.3 การเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น แบบไม่รองพื้น



รูปที่ 3.4 การเชื่อมชิ้นงานตาม JIS Z3114 (หน่วย : mm)

3.1.1 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วในการเชื่อมให้คงที่ซึ่งตัดแปลงมาจากเครื่องตัดโลหะแผ่นด้วยแก๊สทำให้การเชื่อมเป็นแบบอัตโนมัติ สามารถปรับตั้งความเร็วการเคลื่อนที่หัวเชื่อมได้แสดงดังในรูปที่ 3.5 เครื่องเชื่อมที่ใช้เป็นเครื่องเชื่อมมิกแบบแรงดันคงที่ที่วัฏจักรการทำงาน 100 % สามารถปรับแต่งกระแสได้ตามตัวแปรที่กำหนดดังรูปที่ 3.6



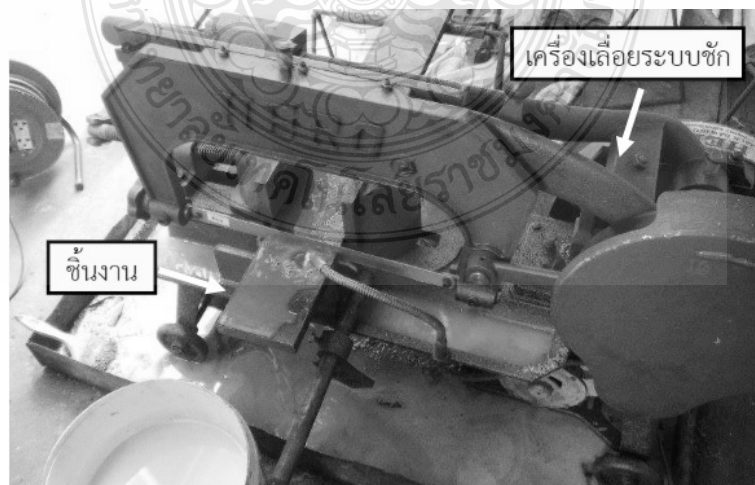
รูปที่ 3.5 ลักษณะอุปกรณ์ควบคุมความเร็วในการเชื่อม



รูปที่ 3.6 ลักษณะเครื่องเชื่อมมิก

3.1.2 การตัดชิ้นงานเชื่อมด้วยเครื่องเลื่อยระบบชัก (Hacksawing Machine)

นำเหล็กกล้าคาร์บอนที่จัดเตรียมมานั้นตัดด้วยเครื่องเลื่อยระบบชัก (Hacksawing Machine) โดยให้น้ำหล่อเย็นช่วยลดความร้อนในการเสียดสีของเหล็กกล้าคาร์บอนกับใบเลื่อยแสดงดังในรูปที่ 3.7 ตัดชิ้นงานให้มีขนาด 100 x 150 มม. ให้ได้ตามมาตรฐาน JIS Z3114 นำเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการตัดด้วยเครื่องเลื่อยระบบชักนั้นมาทำการเจียรผิวชิ้นงานด้วยเครื่องเจียรระโน (Grinding machine) แสดงดังในรูปที่ 3.8 ขัดให้ชิ้นงานมีความเรียบผิวของเนื้อเหล็กเหล็กกล้าคาร์บอนดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.7 การตัดชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องเลื่อยระบบชัก (Hacksawing Machine)



รูปที่ 3.8 การเจียรในผิวชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องเจียรใน (Grinding machine)

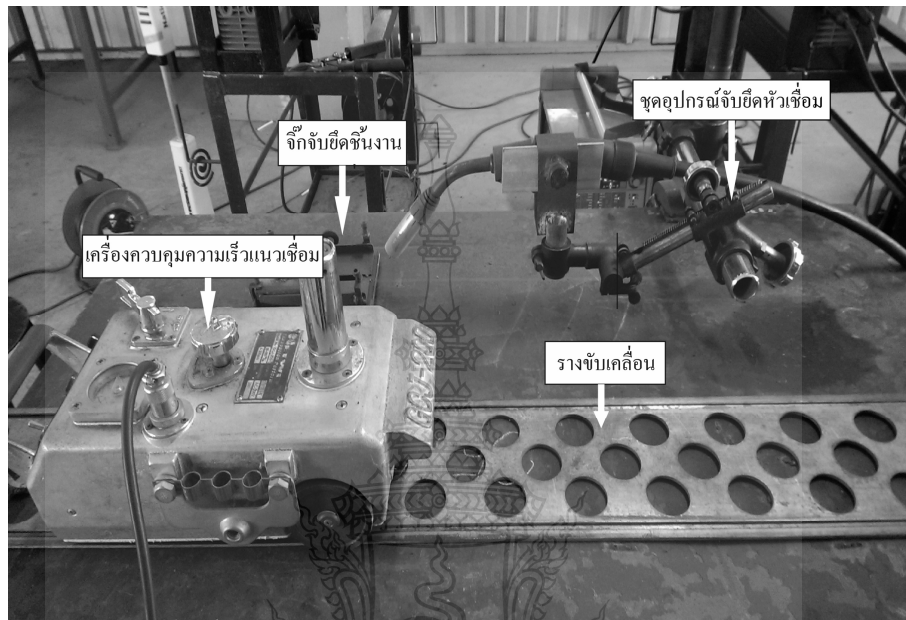


รูปที่ 3.9 ชิ้นงานที่ผ่านการเจียรใน

3.1.3 กระบวนการเชื่อม

การเชื่อมอาร์กถวดไส้ฟลักซ์พอกผิวแข็งได้ทำการกำหนดตัวแปรการเชื่อมที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้ กระแสที่ใช้ในการเชื่อมมี 4 ระดับ คือ 150, 170, 190 และ 210 A ความเร็วในการเดินหัวเชื่อม (Travel Speeds) มีระดับเดียวคือ 150 มิลลิเมตรต่อนาที การติดตั้งชิ้นงานในการเชื่อมแสดงดังรูปที่ 3.10 กำหนดชั้นของแนวเชื่อม 3 ชั้น (Layer) แบบรองพื้นกับไม่รองพื้นทำการเชื่อมและนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนและไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยนำชิ้นงานที่เชื่อมแล้วไปผ่านกระบวนการทางความร้อนได้แก่ การอบอ่อน (Annealing), การชุบแข็ง (Quenching Hardening), และการอบคืนไฟ (Tempering) และผ่านกระบวนการทางความร้อน 3 รอบ เพื่อนำมาทำ

การเปรียบเทียบหาสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของการเชื่อมอาร์กถวดไส้ฟลักซ์ ทุกๆ ครั้งที่จะเชื่อมเสร็จในแต่ละแนวจะต้องวัดอุณหภูมิ Interparttemp ด้วยปืนวัดอุณหภูมิ (Tempgun) ไม่ต่ำกว่า 150 C° ก่อนทำการเชื่อมพอกผิวแข็งแนวต่อไป ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 การตั้งชิ้นงานทดสอบในการเชื่อม



รูปที่ 3.11 ปืนวัดอุณหภูมิ (Tempgun)

3.1.4 ตอกรหัสก่อนการอบ

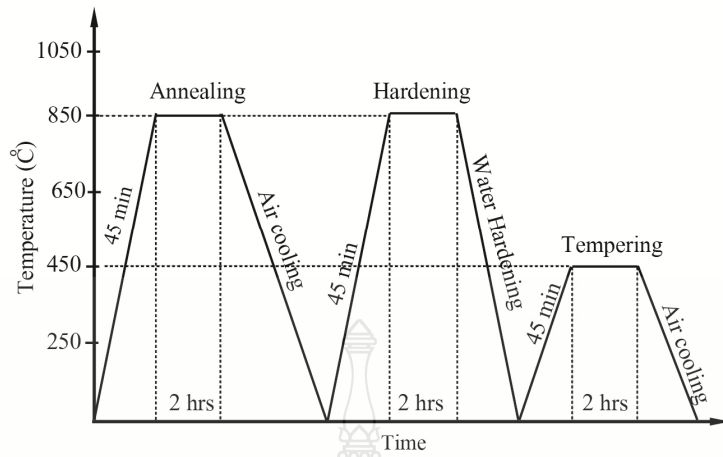
ก่อนการอบนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม มาทำการตอกรหัสเพื่อไม่ให้เกิดการสับสนในกระบวนการทำในขั้นตอนต่อไป ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การตอกรหัสชิ้นงานเชื่อมก่อนการอบชุบ

3.2 กระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม

เตรียมชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแล้ว หลังจากนั้นมาผ่านกระบวนการทางความร้อน มีขั้นตอนในการดำเนินการดังนี้ นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอกผิวแข็งไปอบอ่อน (Annealing) เเผาแช่ที่อุณหภูมิเหนือเส้น Ac_3 ประมาณ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยใช้อุณหภูมิที่ $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ เเผาแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 120 นาที แสดงดังในรูปที่ 3.13 เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตา ด้วยอัตราเย็นตัวประมาณ $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อ นาที หลังจากผ่านการอบอ่อนแล้วนำชิ้นงาน ไปทำการชุบแข็ง (Hardening) ไปเผาที่อุณหภูมิเหนือเส้น Ac_3 ประมาณ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยใช้อุณหภูมิที่ $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ เเผาแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 120 นาที แสดงดังในรูปที่ 3.13 เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้วนำชิ้นงานไปชุบแข็งในน้ำ ดังรูปที่ 3.14 นำชิ้นงานไปอบคืนไฟ (Tempering) เเผาแช่ที่อุณหภูมิ $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 120 นาที แสดงดังในรูปที่ 3.13 เมื่อครบเวลาที่กำหนดปล่อยให้เหล็กเย็นตัวในอากาศ ดังรูปที่ 3.15 จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอกผิวแข็งนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน 3 รอบ แสดงดังในรูปที่ 3.13 แล้วนำชิ้นงานเชื่อมไปทำการทดสอบเปรียบเทียบสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาต่อไปในหัวข้อที่ 3.3



รูปที่ 3.13 แผนภาพขั้นตอนกระบวนการทางความร้อน

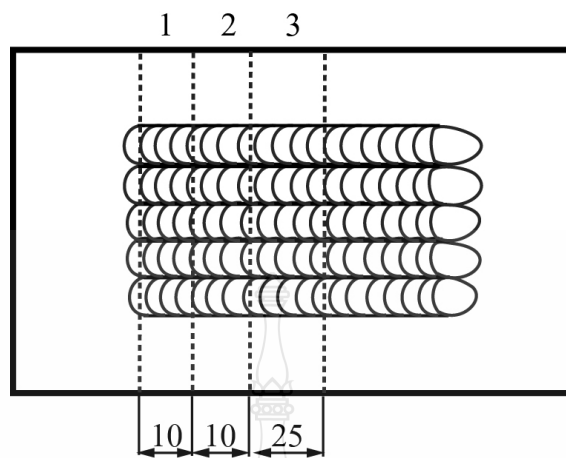


รูปที่ 3.14 ลักษณะการอบชุบแข็งในน้ำ

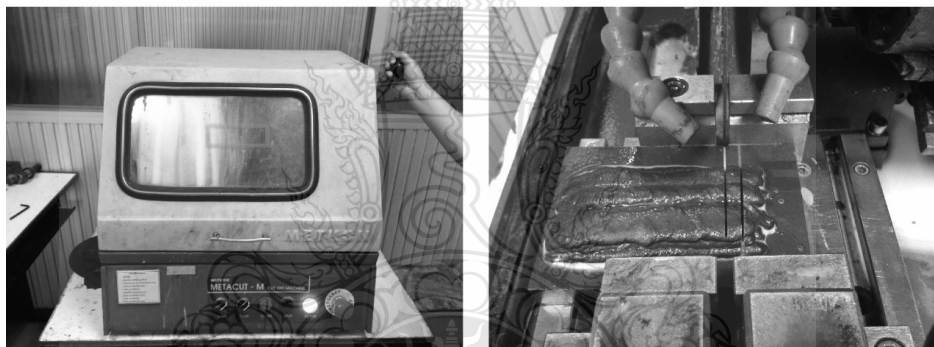


รูปที่ 3.15 ลักษณะการเย็นตัวในอากาศ

3.3 การตัดชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องไมโครคัตเตอร์

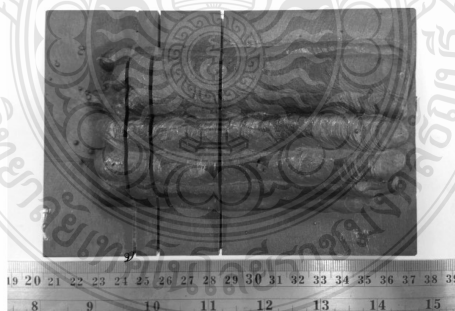


รูปที่ 3.16 การตัดชิ้นงานทดสอบ (หน่วย : มม.)



ก) เครื่องตัดไมโครคัตเตอร์

ข) ขั้นตอนการตัดแบ่งชิ้นงาน



ค) ชิ้นงานที่ผ่านการตัดแบ่ง

รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการตัดแบ่ง

ทำการตัดชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอกผิวแข็งและชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนมาแล้วนั้นทำการตัดด้วยเครื่องตัดไมโครคัตเตอร์ที่มีน้ำหล่อเย็นให้มีขนาด

เป็นไปตามมาตรฐาน JIS Z3114 โดยชั้นที่ 1 ชั้นงานทดสอบโครงสร้างมหภาคขนาด 10 มม. ชั้นที่ 2 ชั้นงานทดสอบความแข็งขนาด 10 มม. ชั้นที่ 3 ชั้นงานทดสอบการสึกหรอขนาด 25 มม. แสดงในผังรูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 แสดงขั้นตอนการตัดแบ่งโดยรูปที่ 3.17 (ก) เป็นเครื่องตัดไมโครคัตเตอร์ที่มีน้ำหล่อเย็นและรูปที่ 3.17 (ข) แสดงขั้นตอนขณะทำการตัดด้วยเครื่องตัดไมโครคัตเตอร์ขณะที่รูป 3.17 (ค) แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัดแบ่งเรียบร้อยแล้ว

3.4 การขัดกระดาษทราย

การขัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 ,200 ,400 ,600 ,800 ,1000 และ 1200 จับชิ้นงานในทิศทางขวางการหมุนของจานขัด เบอร์ถัดไปก็ให้สลับขวางทางการหมุนของจานขัด แนวใหม่ ตอนขัดใช้น้ำในการช่วยเร่งให้เศษของเหล็กออกจากจานขัดแสดงดังในรูปที่ 3.18



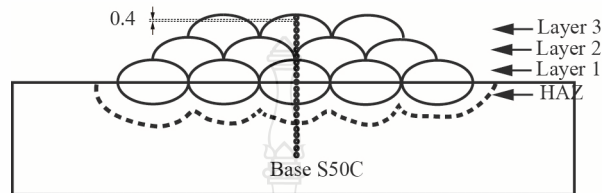
รูปที่ 3.18 วิธีการขัดชิ้นงานทดสอบ

3.5 การทดสอบสมบัติทางกล

3.5.1 การทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ (Microvicker Hardness Testing)

ทำการตัดเตรียมชิ้นงานในทิศทางตั้งฉากกับเนื้อแนวเชื่อม โดยนำไปขัดด้วยกระดาษทรายน้ำ ตั้งแต่เบอร์ 100-800 และ 1200 ตามลำดับ เพื่อให้หน้าชำระสิ่งสกปรกออกให้หมด จนถึงกระดาษทรายเบอร์สุดท้ายล้างด้วยน้ำและเช็ดทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ เป่าแห้งด้วยลมร้อน และทำการทดสอบค่าความแข็งของแนวเชื่อมจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z 3114 แสดงผังรูป

ที่ 3.19 กดลากผ่านเป็นแนวเส้นตรงโดยตั้งฉากกับชิ้นงานโดยผ่านบริเวณแนวเชื่อมชั้นที่ 3, 2 และ 1 พื้นที่ผิวหน้าตัดกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ), ชั้นรองพื้น (Buffer) และเนื้อโลหะ (Base Metal) มีระยะห่างในการกด 0.4 โดยใช้แรงกด 100 gf และใช้เวลาในการกดแค่ 10 min โดยใช้เครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ ดังรูปที่ 3.20 (ก) และแสดงขั้นตอนในการกดทดสอบดังรูปที่ 3.20 (ข)



รูปที่ 3.19 ลักษณะทิศทางการกดด้วยเครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์สroyกดตามมาตรฐาน JIS Z 3114 (หน่วย : มม.)



ก) เครื่องไมโครวิกเกอร์ส

ข) ขั้นตอนการกดทดสอบ

รูปที่ 3.20 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส

3.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

3.6.1 การตรวจสอบแบบโครงสร้างมหภาค (Macro Testing)

การตรวจสอบแบบโครงสร้างมหภาค ทำการตัดชิ้นงานในแนวตั้งฉากกับแนวเชื่อมด้วยเครื่องตัดไมโครคัตเตอร์ หลังจากนั้นมาขัดกระดาษทรายเบอร์ 100-2,000 ทำการกัดกรดส่วนผสมไฮโดรคลอริก (50%) ไนตริก (25%) น้ำ (25%) ตามมาตรฐาน ASTM E360 เพื่อดูโครงสร้างที่ได้จากการเชื่อมของชิ้นงานทดสอบ

3.6.2 การตรวจสอบแบบโครงสร้างจุลภาค (Micro Testing)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Micro Scope) ที่กำลังขยาย 50-500 เท่า จัดด้วยกระดาษทรายจากเบอร์หยาบ ไปจนถึงเบอร์ละเอียด โดยเริ่มจากเบอร์ 100-1,200 ตามลำดับ ในขณะที่จะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้น้ำชำระสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ ผงโลหะ และซิลิโคนคาร์ไบด์ออกให้หมด และในการขัดควรใช้แรงกดพอประมาณ ไม่ควรออกแรงกดมากเกินไปจะทำให้โครงสร้างของชิ้นทดสอบเกิดความบกพร่องจนทำให้การตรวจสอบโครงสร้างเกิดข้อผิดพลาดได้ จากนั้นจะนำไปขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) ที่มีขนาดตั้งแต่ 1-3 μm เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงเพชร (Diamond) ล้างด้วยน้ำและเช็ดทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ เป่าแห้งด้วยลม เมื่อเสร็จขั้นตอนดังกล่าวทำการกัดกรดที่มีส่วนผสมของกรด ประกอบด้วย ไฮโดรคลอริก (50%) ไนตริก (25%) และน้ำอีก (25%) ตามมาตรฐาน ASTM E 360 ใช้เวลาในการจุ่มแช่นาน 8-15 min จากนั้นล้างกรดด้วยน้ำและเอทานอลและเช็ดทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ เป่าแห้งด้วยลม นำชิ้นงานทดสอบมาตรวจดูโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ แสดงดังรูปที่ 3.21 เพื่อดูการกระจายตัวลักษณะของเกรน บริเวณแนวเชื่อม (Weld Zone) บริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone : HAZ)



รูปที่ 3.21 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Micro Scope)

3.6.3 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) นำชิ้นงานตัวแปรการเชื่อมที่มีสมบัติทางกลดีที่สุด มาทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.7 การทดสอบการสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอ (Wear Resistance) แบบขัดสีแสดงดังในรูปที่ 3.23 โดยใช้ทรายแห้งและล้อยางมีความแข็งเท่ากับ 80 Shore A เป็นตัวสัมผัสกับชิ้นงานที่ทดสอบ และทำการเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์มวลที่สูญเสียไป โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM G65-94 [32] ทำการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีบริเวณเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ความเร็วรอบของล้อขัด 200 rpm/min อัตราการไหลของทราย 300-400 g/min ขนาดของทราย 300-400 μm โดยใช้เวลาในการขัดสี 30 min/prices หรือเป็นระยะทาง 4.306 km น้ำหนักที่ใช้กดชิ้นงาน 130 N



รูปที่ 3.23 เครื่องทดสอบการสีกรอ (Dry San Rubber Wheel : DSRW)



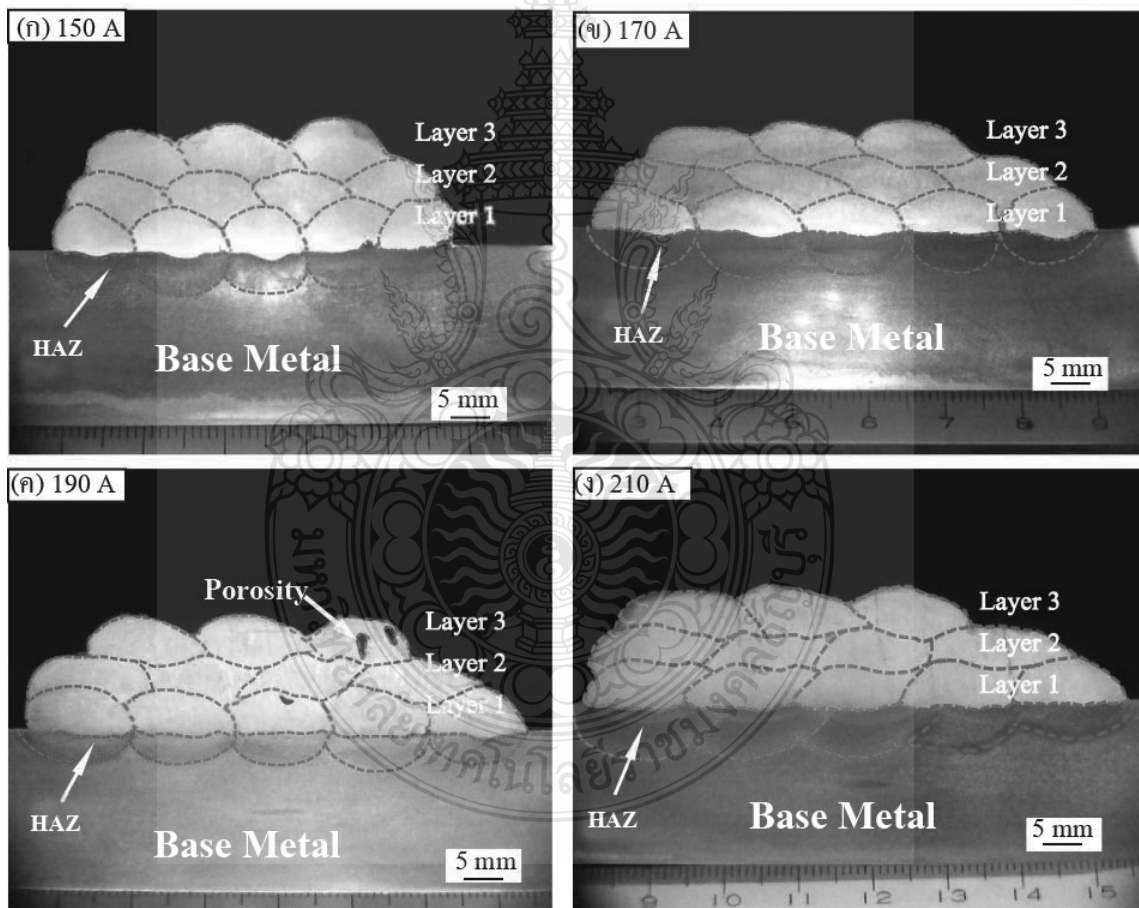
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการดำเนินการวิจัยการเชื่อมอาร์กทวดไส้ฟลักซ์พอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C แล้วนำชิ้นงานที่เชื่อมปรับปรุงด้วยความร้อน คือ การชุบแข็ง การอบคืนไฟ และการอบอ่อน ทดสอบเปรียบเทียบสมบัติทางกลและตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยา ผลการดำเนินการดังนี้

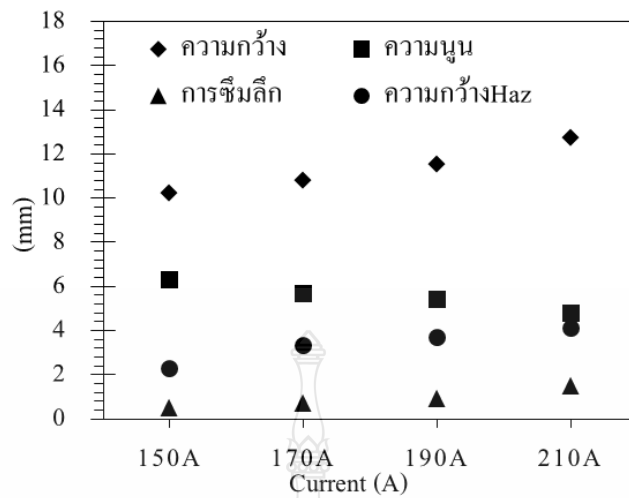
4.1 อิทธิพลของกระแสเชื่อมที่ผลต่อโครงสร้างมหภาค

4.1.1 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้น



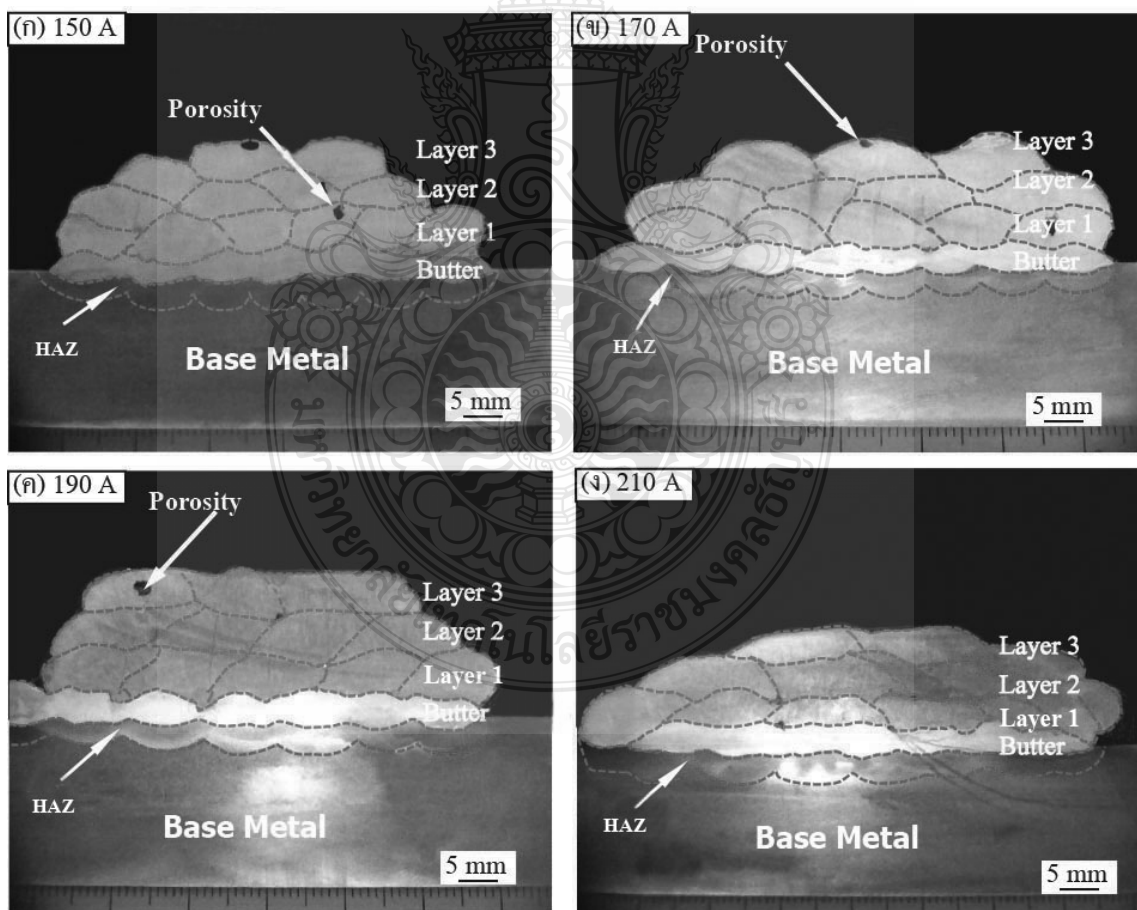
รูปที่ 4.1 โครงสร้างมหภาคแบบไม่มีชั้นรองพื้นกระแสเชื่อม (ก) 150, (ข) 170, (ค) 190 และ(ง) 210 A

รูปที่ 4.1 (ก) แสดงลักษณะ โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้นที่ กระแสเชื่อม 150 A พบว่าแนวเชื่อมพอกผิวแข็งมีลักษณะนูนสูงไม่ปรากฏจุดบกพร่องเกิดขึ้นขณะที่ ทำการตรวจสอบที่กระแสเชื่อมสูงขึ้นไปกระแสเชื่อม 170 A แนวเชื่อมมีความนูนต่ำลงและมีความ กว้างเพิ่มขึ้นทำให้แนวเชื่อมมีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้นแต่มีความกว้างแนวเชื่อมและบริเวณผิวกระทบ ร้อนกว้างมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.1 (ข) และรูปที่ 4.1 (ค) แสดงโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่ กระแส 190 A พบว่าแนวเชื่อมพอกผิวแข็งมีความนูนลดลง ความกว้างและบริเวณผิวกระทบร้อน กว้างมากขึ้นปรากฏจุดบกพร่องโพรงอากาศ (Porosity) แสดงดังในรูปที่ 4.1 (ค) ลูกศรชี้ ขณะที่รูปที่ 4.1 (ง) แสดงโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมแบบไม่มีการรองพื้นที่กระแสเชื่อม 210 A พบว่าแนว เชื่อมพอกผิวแข็งมีความนูนต่ำที่สุดความกว้างแนวเชื่อมและบริเวณกระทบร้อนกว้างมากที่สุด แนว เชื่อมมีความสมบูรณ์ไม่พบจุดบกพร่อง ผลการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมแบบไม่มี ชั้นรองพื้นพบว่ากระแสเชื่อมที่สูงขึ้นส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีความนูนลดลง ความกว้างและบริเวณ กระทบร้อนเพิ่มมากขึ้นรูปที่ 4.3 แสดงการวัดค่าขนาดต่างๆของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่เชื่อมด้วย กระแสเชื่อมที่ต่างกันพบว่าค่าความกว้างของแนวเชื่อมมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมสูงขึ้น โดย กระแสเชื่อมที่ 150 A ให้ค่าความกว้างแนวเชื่อมต่ำสุดที่ 10.2 มม. และกระแสเชื่อมที่ 210 A ให้ค่า ความกว้างแนวเชื่อมสูงสุดที่ 12.7 มม. ส่วนค่าความนูนนั้นพบว่าความนูนของแนวเชื่อมมีแนวโน้ม ต่ำลงเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นโดยกระแสเชื่อมที่ 150 A ให้ค่าความนูนสูงสุดที่ 6.3 มม. ส่วน กระแสไฟเชื่อมที่ 210 A ให้ค่าความนูนต่ำสุดที่ 4.8 มม. ในขณะที่ค่าการซึมลึกของแนวเชื่อมมี แนวโน้มสูงขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมสูงขึ้น โดยกระแสเชื่อมที่ 150 A มีค่าระยะการซึมลึกต่ำสุดที่ 0.5 มม. ส่วนกระแสเชื่อมที่ 210 A มีค่าระยะการซึมลึกสูงสุดที่ 1.5 มม. เห็นได้ว่าเมื่อค่ากระแสเชื่อมที่สูงขึ้น ค่าระยะการซึมลึกก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ส่วนค่าความกว้างบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อกระแสไฟเชื่อมสูงขึ้น โดยกระแสเชื่อมที่ 150 A ให้ค่าความกว้าง HAZ ต่ำสุดที่ 2.3 มม. ส่วนกระแสเชื่อมที่ 210 A ให้ค่าความกว้าง HAZ สูงสุดที่ 4.1 มม.



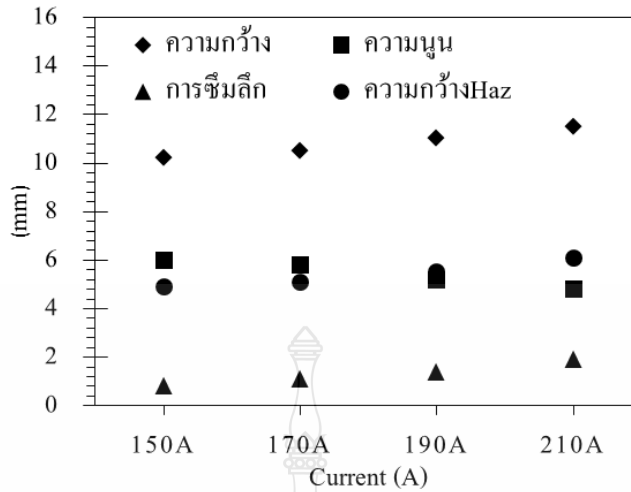
รูปที่ 4.2 การวัดขนาดแนวเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้นด้วยกระแสเชื่อมต่างกัน

4.1.2 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้น



รูปที่ 4.3 โครงสร้างมหภาคแบบมีชั้นรองพื้นกระแสเชื่อม (ก) 150, (ข) 170, (ค) 190 และ(ง) 210 A

รูปที่ 4.3 (ก) แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้นที่ กระแสเชื่อม 150 A พบว่าแนวเชื่อมชั้นรองพื้น (Buffer layer) มีความสมบูรณ์ไม่พบจุดบกพร่อง และแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing layer) มีลักษณะนูนสูงพบจุดบกพร่องเกิดโพรงอากาศแสดงดัง ลูกศรชี้ และรูปที่ 4.3 (ข) แสดงลักษณะโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่กระแสเชื่อม 170 A พบว่าแนวเชื่อมชั้นรองพื้นมีความสมบูรณ์ไม่พบจุดบกพร่อง และแนวเชื่อมพอกผิวแข็งมีความนูนลดลง แต่มีความกว้างแนวเชื่อมและบริเวณผิวกระทบร้อนกว้างมากขึ้น เกิดจุดบกพร่องเกิดโพรงอากาศแสดงดังลูกศรชี้ รูปที่ 4.3 (ค) แสดงโครงสร้างมหภาคของกระแสเชื่อม 190 A พบว่าแนวเชื่อมชั้นรองพื้นมีความสมบูรณ์ไม่พบจุดบกพร่องเหมือนกับกระแสเชื่อม 150 และ 170 A ขณะที่แนวเชื่อมพอกผิวแข็งมีความนูนลดลง ความกว้างและบริเวณผิวกระทบร้อนกว้างมากขึ้น แต่พบจุดบกพร่องโพรงอากาศคล้ายกับกระแสเชื่อม 150 และ 170 A และรูปที่ 4.3 (ง) แสดงโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมแบบรองพื้นที่กระแสเชื่อม 210 A พบว่าแนวเชื่อมชั้นรองพื้นมีความสมบูรณ์ไม่พบจุดบกพร่อง และแนวเชื่อมมีความนูนต่ำที่สุด ความกว้างแนวเชื่อมและบริเวณกระทบร้อนกว้างมากที่สุด แนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ไม่พบจุดบกพร่อง จากการตรวจสอบพบว่า การเชื่อมแบบรองพื้นทำให้เกิดโพรงอากาศมากกว่าการเชื่อมแบบไม่รองพื้นแสดงดังรูปที่ 4.3 และกระแสเชื่อมที่สูงขึ้นส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีความนูนลดลง ความกว้างของแนวเชื่อมและบริเวณกระทบร้อนเพิ่มมากขึ้น รูปที่ 4.4 แสดงการวัดค่าขนาดต่างๆของแนวเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้นก่อนการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยกระแสไฟเชื่อมที่ต่างกัน หลังการตรวจสอบพบว่าค่าความกว้างของแนวเชื่อมนั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น โดยกระแสเชื่อมที่ให้ค่าความกว้างแนวเชื่อมต่ำสุดคือ 150 A ให้ค่าความกว้างของแนวเชื่อม 10.2 มม. และกระแสเชื่อมที่ให้ค่าความกว้างแนวเชื่อมสูงที่สุดคือ 210 A ให้ค่าความกว้างของแนวเชื่อมที่ 11.5 มม. ส่วนค่าความนูนนั้นพบว่าความนูนของแนวเชื่อมมีแนวโน้มต่ำลงเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น โดยกระแสเชื่อมที่ให้ค่าความนูนสูงที่สุดคือ 150 A ให้ค่าความนูนที่ 6 มม. ส่วนกระแสไฟเชื่อมที่ให้ค่าความนูนต่ำที่สุดคือ 210 A ให้ค่าความนูนที่ 4.8 มม. ในขณะเดียวกันค่าการซึมลึกของแนวเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มกระแสเชื่อม โดยกระแสเชื่อมที่ 150 A ให้ค่าระยะการซึมลึกต่ำสุดที่ 0.8 มม. ส่วนกระแสเชื่อมที่ 210 A ให้ค่าระยะการซึมลึกสูงที่สุดที่ 1.9 มม. ส่วนค่าความกว้างของบริเวณกระทบร้อนนั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น โดยกระแสเชื่อมที่ 150 A นั้นให้ค่าความกว้างบริเวณกระทบร้อนต่ำสุดที่คือ 4.9 มม. ส่วนกระแสไฟเชื่อมที่ 210 A ให้ค่าความกว้าง HAZ สูงสุดที่ 6.1 มม.

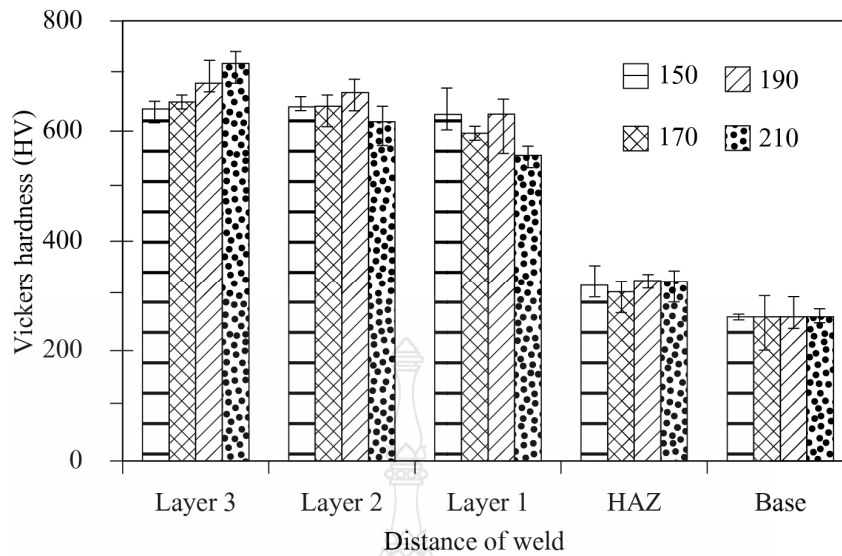


รูปที่ 4.4 การวัดขนาดแนวเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้นด้วยกระแสเชื่อมที่ต่างกัน

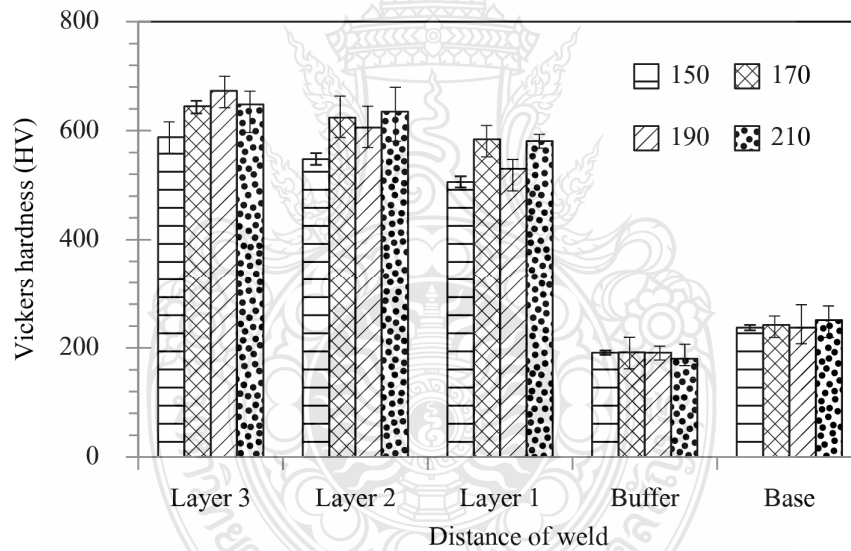
4.2 อิทธิพลของกระแสเชื่อมที่ผลต่อความแข็งจุลภาค

4.2.1 ความแข็งจุลภาคแนวเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้นและแบบมีชั้นรองพื้น

ผลการทดสอบความแข็งจุลภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มีชั้นรองพื้นที่ กระแสเชื่อม 150-210 A พบว่าบริเวณ โลหะขึ้น (Base) งานเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C มีค่าความแข็งประมาณ 250 HV และบริเวณกระทบร้อน (HAZ) มีค่าประมาณ 320 HV และที่บริเวณชั้นแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ Layers 1, Layers 2 และ Layers 3 มีแนวโน้มของค่าความแข็งจุลภาคสูงขึ้นตามจำนวนชั้นพอกผิวแข็งและค่าความแข็งจุลภาคสูงสุดคือ แนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ Layers 3 มีค่าประมาณ 723 HV แสดงดังในรูปที่ 4.5 อย่างไรก็ตามสาเหตุที่ค่าความแข็งของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งมีค่าแตกต่างกัน คือ เกิดจากการเจือจางของส่วนผสมทางเคมีส่งผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น [28] และการลดลงของค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน สอดคล้องกับงานวิจัยของ [29] ได้อธิบายสาเหตุว่าเป็นการสูญเสียปริมาณของคาร์บอนที่ลดลงและประกอบกับโครงสร้างมีความละเอียดสม่ำเสมอ และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีชั้นรองพื้นพบว่าความแข็งจุลภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ Layers 1, Layers 2 และ Layers 3 ที่กระแสเชื่อม 150-210 A มีแนวโน้มสูงขึ้นตามจำนวนชั้นพอกผิวแข็งและมีค่าความแข็งจุลภาคสูงที่ชั้น Layers 3 ซึ่งคล้ายกับการเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มีชั้นรองพื้น ขณะที่ความค่าความแข็งบริเวณรองพื้น (Buffer) ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม MIG-70S พบว่าค่าความแข็งบริเวณรองพื้นมีค่าความแข็งต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะขึ้นงาน โดยมีค่าความแข็งของบริเวณชั้นรองพื้นประมาณ 190 HV แสดงดังในรูปที่ 4.6 ที่บริเวณชั้นรองพื้น (Buffer layer)



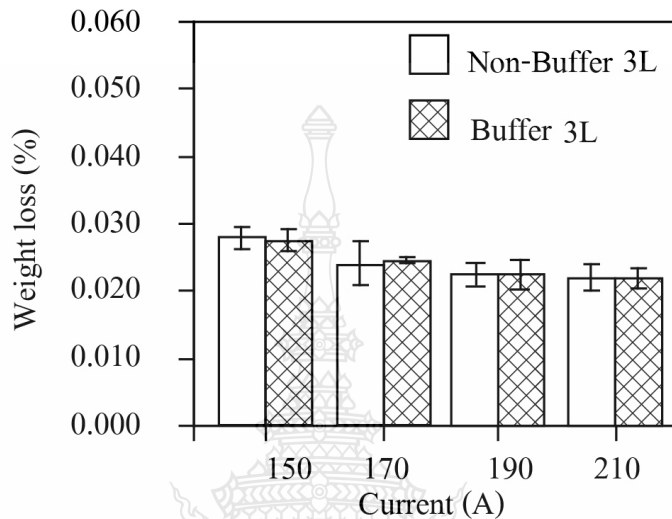
รูปที่ 4.5 ความแข็งจุลภาคของกระแสเชื่อม 150 – 210 A แบบไม่มีชั้นรองพื้น



รูปที่ 4.6 ความแข็งจุลภาคของกระแสเชื่อม 150 – 210 A แบบมีชั้นรองพื้น

รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 ของการเชื่อมที่ไม่มีชั้นรองพื้นและมีชั้นรองพื้นที่กระแสเชื่อม 150-210 A พบว่าความต้านทานการสึกหรอหรือน้ำหนักสูญหายของชิ้นงานทดสอบแปรผกผันกับค่าความแข็งของชั้นพอกผิวแข็ง ความแข็งที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความต้านทานการสึกหรอหรือน้ำหนักสูญหายของชิ้นทดสอบลดลง ความต้านทานการสึกหรอมีแนวโน้มที่ลดลง นอกจากนั้นแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีชั้นรองพื้นแสดงค่าความต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่าแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่ไม่มีชั้นรองพื้นเพียงเล็กน้อย เมื่อ

เปรียบเทียบความต้านทานการสึกหรอของชั้นพอกผิวแข็งที่ 3 ของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150-210 A ค่าการสูญหายของน้ำหนักของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งมีค่าลดลงเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น และแสดงค่าการสูญหายของน้ำหนักของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งต่ำสุด หรือความต้านทานการสึกหรอ สูงสุดที่กระแสเชื่อม 210 A และเป็น โลหะเชื่อมพอกผิวแข็งแบบที่มีชั้นรองพื้น



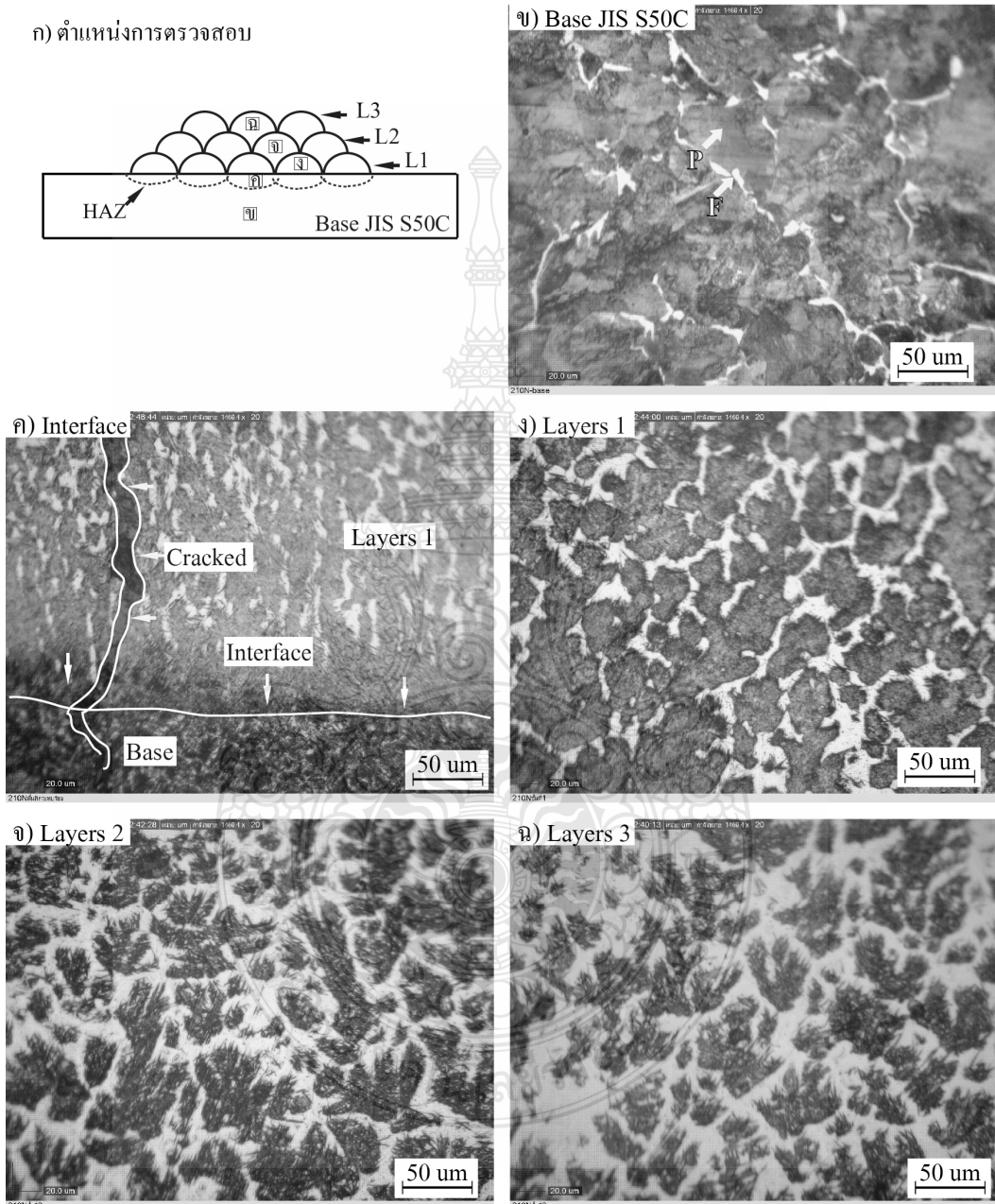
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูญหาย กระแสเชื่อมของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น แบบไม่มีชั้นรองพื้นและมีชั้นรองพื้นที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 150-210 A (3L=Layers 3)

4.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้นแบบไม่มีชั้นรองพื้นและมีชั้นรองพื้นที่กระแสเชื่อม 150-210 A

4.3.1 โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้นแบบไม่มีชั้นรองพื้น

รูปที่ 4.8 (ก) แสดงตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะขึ้นงานพบโครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยโครงสร้างมีลักษณะเป็นพื้นสีขาวและสีดำ [30, 31] แสดงดังในรูปที่ 4.8 (ข) และเมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อ (Interface) ระหว่างชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 กับโลหะขึ้นงานพบว่าในรอยเชื่อมพอกผิวแข็งเกิดการแตกร้าวมิติทิศทางจากบนลงล่างระหว่างชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 กับโลหะขึ้นงาน โดยทำการวัดขนาดรอยแตกร้าวมิตินี้ค่าเฉลี่ยความกว้างของรอยแตกร้าวมิตินี้ประมาณ 12.33 ไมโครเมตร แสดงดังในรูปที่ 4.8 (ค) อย่างไรก็ตาม Tsai, Jeng et al [32] ได้อธิบายการป้องกันการเกิดรอยแตกในรอยเชื่อมพอกผิวแข็งคือ มีการอุ่นขึ้นงานเชื่อมที่เหมาะสมหรือการเชื่อมชั้นรองพื้นเพื่อป้องกันการเกิดรอยแตกร้าวมิตินี้ในการเชื่อมพอกผิวแข็ง และทำการตรวจสอบบริเวณแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 พบโครงสร้างจุลภาคมีรูปร่างคล้ายตาข่ายซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้างที่มีพื้นที่เฟสสีขาว (Phase white) และโครงสร้างที่มีพื้นที่เฟสสีดำ (Phase black) และทำ

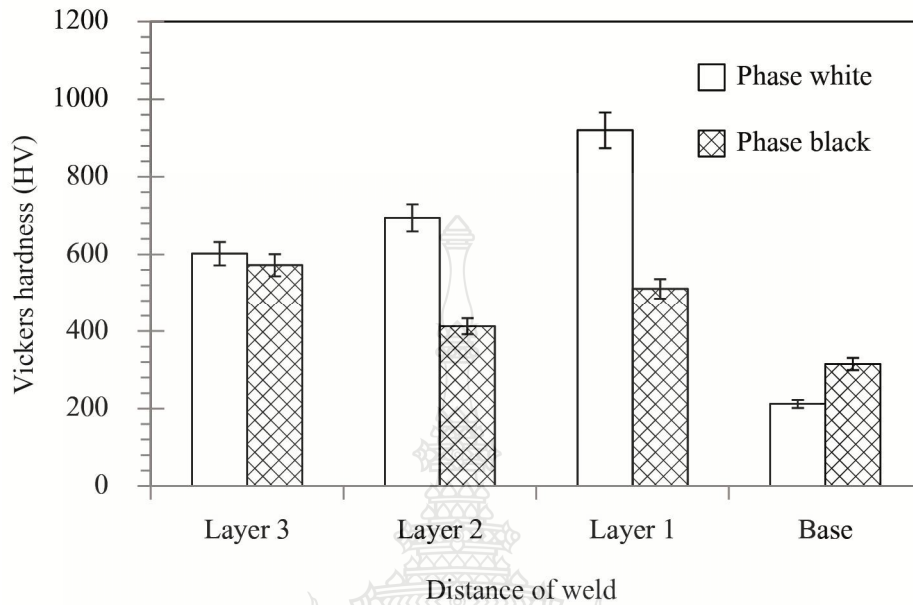
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชั้นที่ 2 และ 3 ด้วยตาเปล่าพบว่าโครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลง ปริมาณของเฟสสีขาวและเฟสสีดำและรูปร่างของโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงตามชั้นพอกผิวแข็งที่ เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามได้ทำการทดสอบความแข็งจุลภาคของ



รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคชั้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้นแบบไม่มีชั้นรองพื้น กำลังขยาย 200 เท่า

โครงสร้างที่มีพื้นที่เฟสสีขาวและโครงสร้างที่มีพื้นที่เฟสสีดำโดยใช้โหลดในการทดสอบ 100 gf พบว่าการเปลี่ยนแปลงเฟสสีขาวที่เพิ่มในชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 ส่งผลต่อค่าความแข็งจุลภาคสูงกว่า

ปริมาณของโครงสร้างที่มีพื้นที่เฟสสีดำลดลง โดยมีค่าความแข็งของเฟสสีขาวประมาณ 602 HV และค่าความแข็งของเฟสสีดำประมาณ 572 HV แสดงดังในรูปที่ 4.9

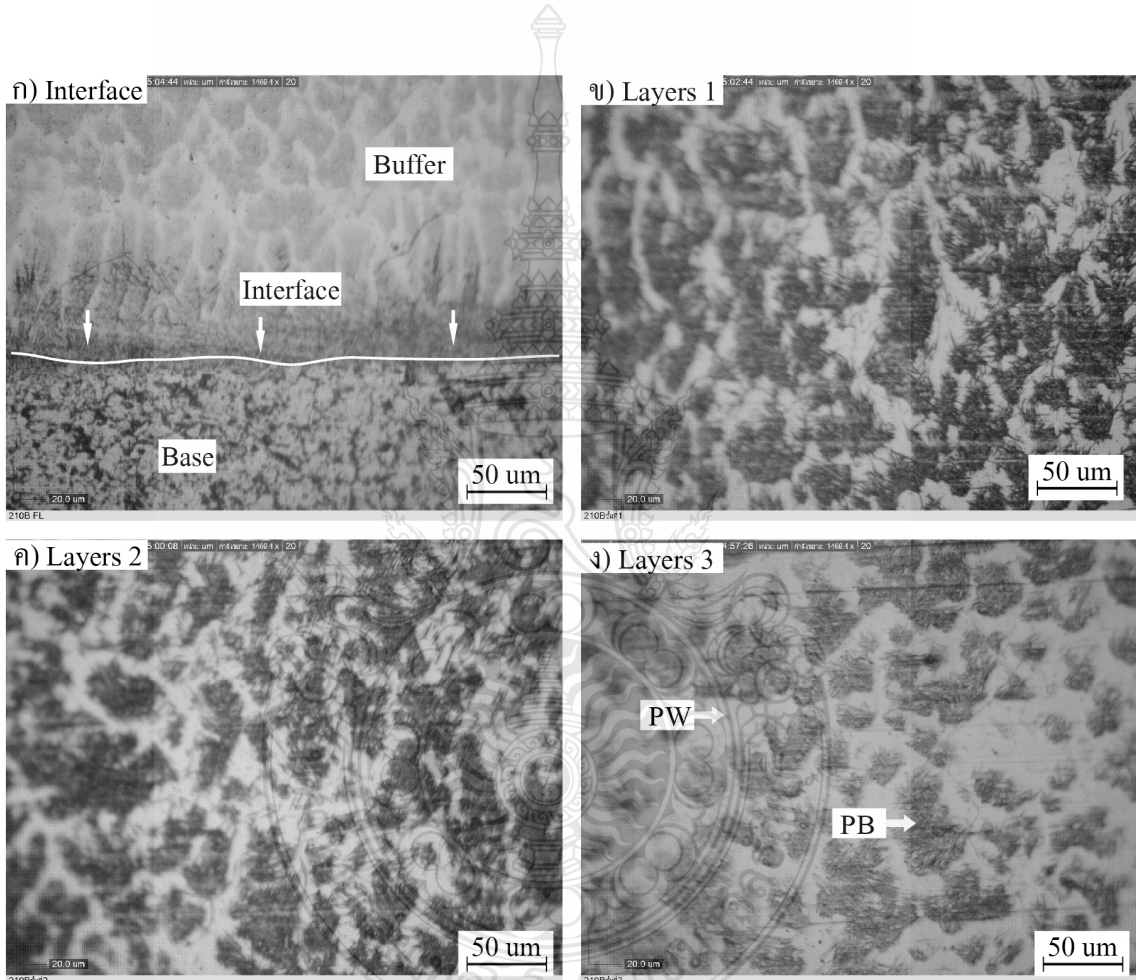


รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบความแข็งจุลภาคของเฟสสีขาวกับเฟสสีดำแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้นแบบไม่มีชั้นรองพื้น

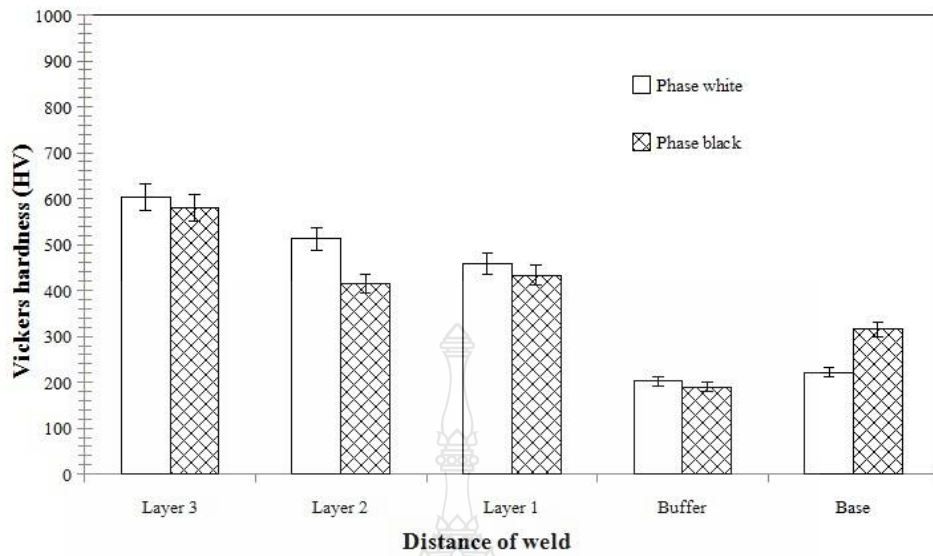
4.3.2 โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้นแบบมีชั้นรองพื้น

รูปที่ 4.10 (ก) แสดงตำแหน่งตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อ (Interface) ระหว่างชั้นรองพื้น (Buffer) กับโลหะชิ้นงานพบว่ารอยต่อเชื่อมมีความสมบูรณ์ไม่พบรอยแตกร้าวระหว่างอินเทอร์เฟสซึ่งเป็นไปตาม Tsai, Jeng et al ที่กล่าวเกี่ยวกับการป้องกันรอยแตกร้าวระหว่างโลหะชิ้นงานกับชั้นพอกผิวแข็ง โดยมีการเชื่อมรองพื้นก่อนที่จะเชื่อมด้วยลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง แต่เมื่อสังเกตโครงสร้างจุลภาคของชั้นรองพื้นพบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคมีการกระจายตัวเป็นกลุ่มก้อนแต่เมื่อเข้าใกล้บริเวณรอยต่อมีรูปร่างขนาดยาวมีทิศทางตั้งฉากกับเส้นรอยต่อ ขณะที่แนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีรูปร่างลักษณะคล้ายโครงสร้างเบนไนต์ละเอียด (Granular bainite) ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Wang, Chen et al. [33] ซึ่งประกอบด้วยพื้นที่เฟสสีขาวและเฟสสีดำแสดงดังในรูปที่ 4.10 (ข) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 ที่ไม่มีชั้นรองพื้นดังรูปที่ 4.8 (ง) มีลักษณะกระจายตัวของพื้นที่สีดำเป็นกลุ่มก้อนต่างจากรูปที่ 4.10 (ข) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างจุลภาคของชั้นที่ 2 และ 3 พบว่ามีรูปร่างโครงสร้างเบนไนต์มีความกลมมนมากขึ้น แต่เมื่อสังเกตปริมาณของพื้นที่เฟสสีขาวและเฟสสีดำด้วยตาเปล่าจากรูปถ่ายโครงสร้าง

จุลภาคพบว่าพื้นที่เฟสสีขาวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นพอกผิวแข็งขณะที่พื้นที่เฟสสีดำมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามได้ทำการทดสอบความแข็งจุลภาคโดยทดสอบระหว่างบริเวณพื้นที่เฟสสีขาวและเฟสสีดำ พบว่าค่าความแข็งมีความแตกต่างกันโดยเมื่อเปรียบเทียบพื้นที่เฟสสีขาวและเฟสสีดำของผิวพอกแข็งชั้นที่ 3 พบว่า การมีปริมาณของพื้นที่เฟสสีขาวมากกว่าพื้นที่เฟสสีดำส่งผลต่อค่าความแข็งสูง โดยมีค่าความแข็งของชั้นที่ 3 เฟสสีขาว 603 HV และเฟสสีดำ 581 HV แสดงดังรูปที่ 4.11

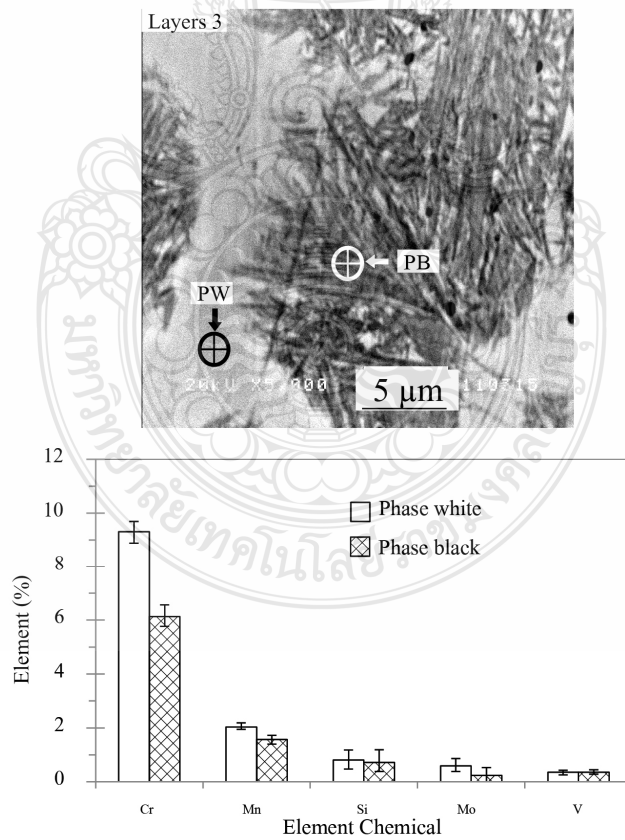


รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้นแบบมีชั้นรองพื้น กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้นแบบไม่มีชั้นรองพื้น กำลังขยาย 200 เท่า

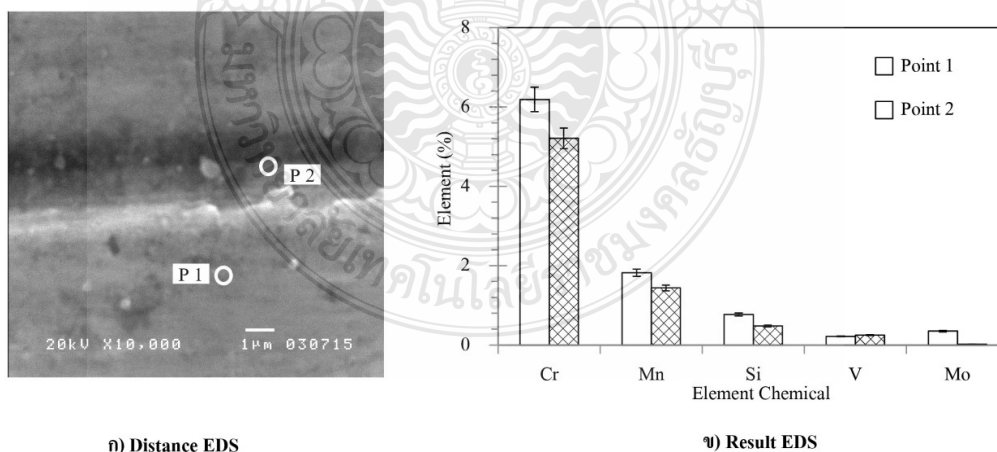
4.4 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3

รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 ด้วยการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วย EDS ที่ตำแหน่งเฟสสีขาว (PW) และเฟสสีดำ (PB) พบว่าที่ตำแหน่งเฟสสีขาวมีปริมาณของธาตุโครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) ซิลิกอน (Si) โมลิบดีนัม (Mo) และวานาเดียม V สูงกว่าบริเวณตำแหน่งตรวจสอบเฟสสีดำแสดงดังรูปที่ 4.12 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [34] ที่ได้กล่าวว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุโครเมียม (Cr) และ โมลิบดีนัม (Mo) ส่งผลต่อความความแข็งแรงสูงของแนวเชื่อมและสอดคล้องกับการทดสอบความแข็งจุลภาคของพื้นเฟสสีขาวที่มีค่าความแข็งสูงกว่าพื้นที่เฟสสีดำของชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 ดังรูปที่ 4.9 และ 4.11 และยังส่งผลต่อค่าความต้านทานการสึกหรอ ดังในรูปที่ 4.7

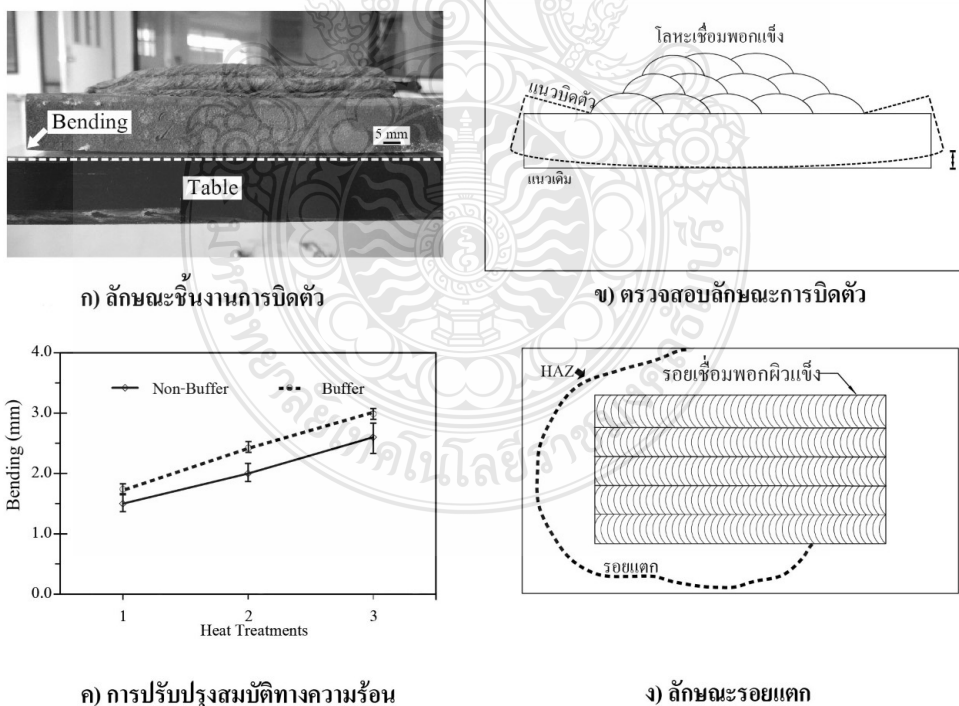
รูปที่ 4.13 (ก) แสดงภาพถ่ายผิวทดสอบการสึกหรอของโลหะพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 210 A และเป็นการเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้นก่อนการเชื่อมพอกผิวแข็งซึ่งเป็นสภาวะการเชื่อมที่ให้ค่าความต้านทานการสึกหรอสูงสุดในรูปที่ 4.7 การตรวจสอบผิวของโลหะพอกผิวแข็งที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ โดยแบ่งการตรวจสอบออกเป็น 2 จุด คือ ตำแหน่งผิวบนที่เกิดการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่า (P 1) และตำแหน่งผิวเว้าลึกลงไปโลหะเชื่อมที่เกิดการสูญเสียน้ำหนักมากกว่า (P 2) ผลการทดสอบส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 4.13 (ข) พบว่าตำแหน่งผิวบนที่แสดงความต้านทานการสึกหรอสูง หรือมีการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่าประกอบด้วยส่วนผสมของธาตุคือ โครเมียม แมงกานีส ซิลิกอน โมลิบดีนัม และวานาเดียม ในปริมาณสูงกว่าตำแหน่งผิวเว้าที่แสดงความต้านทานการสึกหรอต่ำกว่าซึ่งเป็นธาตุที่เสริมความแข็งแรงของเหล็ก



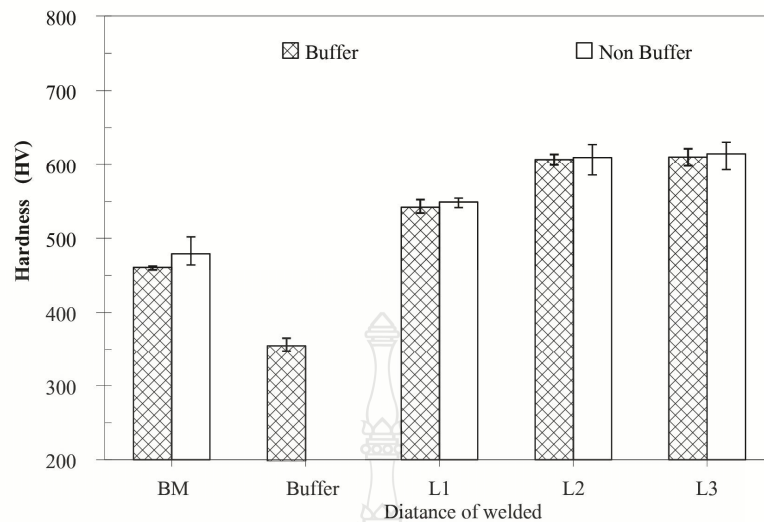
รูปที่ 4.13 ตำแหน่งการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของผิวการทดสอบการสึกหรอ (P1=Point 1, P2=Point)

4.5 การปรับปรุงสมบัติของชั้นพอกผิวแข็งด้วยความร้อน อบอ่อน ชุบแข็ง และการอบคืนไฟ

รูปที่ 4.14 ผลการตรวจสอบรูปร่างของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน 3 รอบ ได้แก่ อบอ่อน ชุบแข็ง และการอบคืนไฟ พบว่าลักษณะของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน 3 รอบ แบบไม่มีชั้นรองพื้นและแบบมีชั้นรองพื้น ลักษณะของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งเกิดการบิดแอ่นตัว (Bending) แสดงดังในรูปที่ 4.14 (ก) และได้ทำการวัดค่าการบิดแอ่นตัวของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งแสดงวิธีการตรวจสอบลักษณะการบิดแอ่นตัวแสดงดังรูปที่ 4.14 (ข) พบว่า ค่าการบิดแอ่นตัวของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นตามจำนวนครั้งที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนแบบไม่มีชั้นรองพื้นมีค่าการบิดแอ่นตัวสูงประมาณ 2.8 mm และแบบมีชั้นรองพื้น 3 mm คือ ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่กระบวนการทางความร้อน 3 ครั้ง แสดงดังในรูปที่ 4.14 (ค) และอีกทั้งยังพบรอยแตกกว้างรอบๆ แนวเชื่อม ใกล้บริเวณกระทบร้อนของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนแสดงดังในรูปที่ 4.14.(ง) ขณะที่ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนไม่พบการบิดแอ่นตัวและรอยแตกกว้างรอบๆ แนวเชื่อม ใกล้บริเวณกระทบร้อนเกิดขึ้นบนชิ้นงานเชื่อม



รูปที่ 4.14 รูปจำลองการบิดแอ่นตัวและลักษณะรอยแตกชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

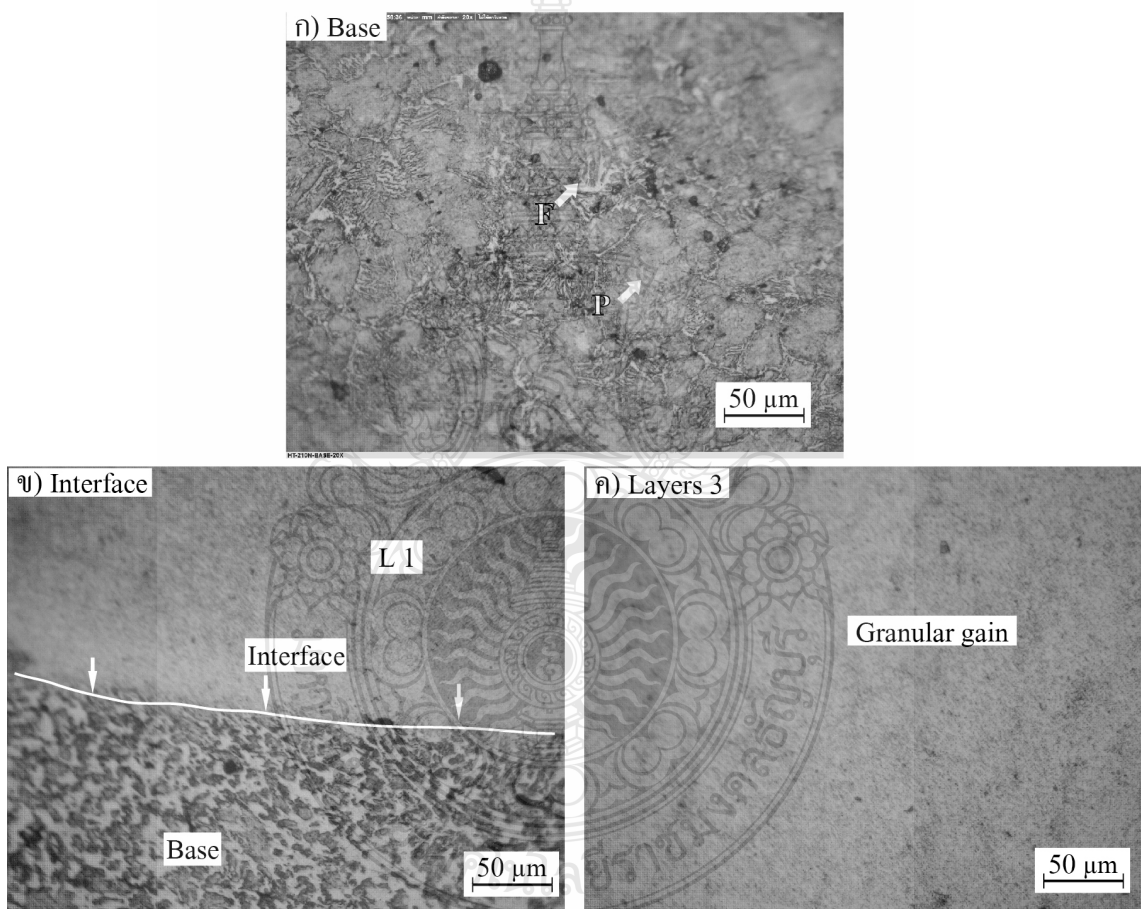


รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบความแข็งจุลภาคปรับปรุงสมบัติของชั้นพอกผิวแข็งด้วยความร้อน อบอ่อน ชุบแข็ง และการอบคืนไฟ

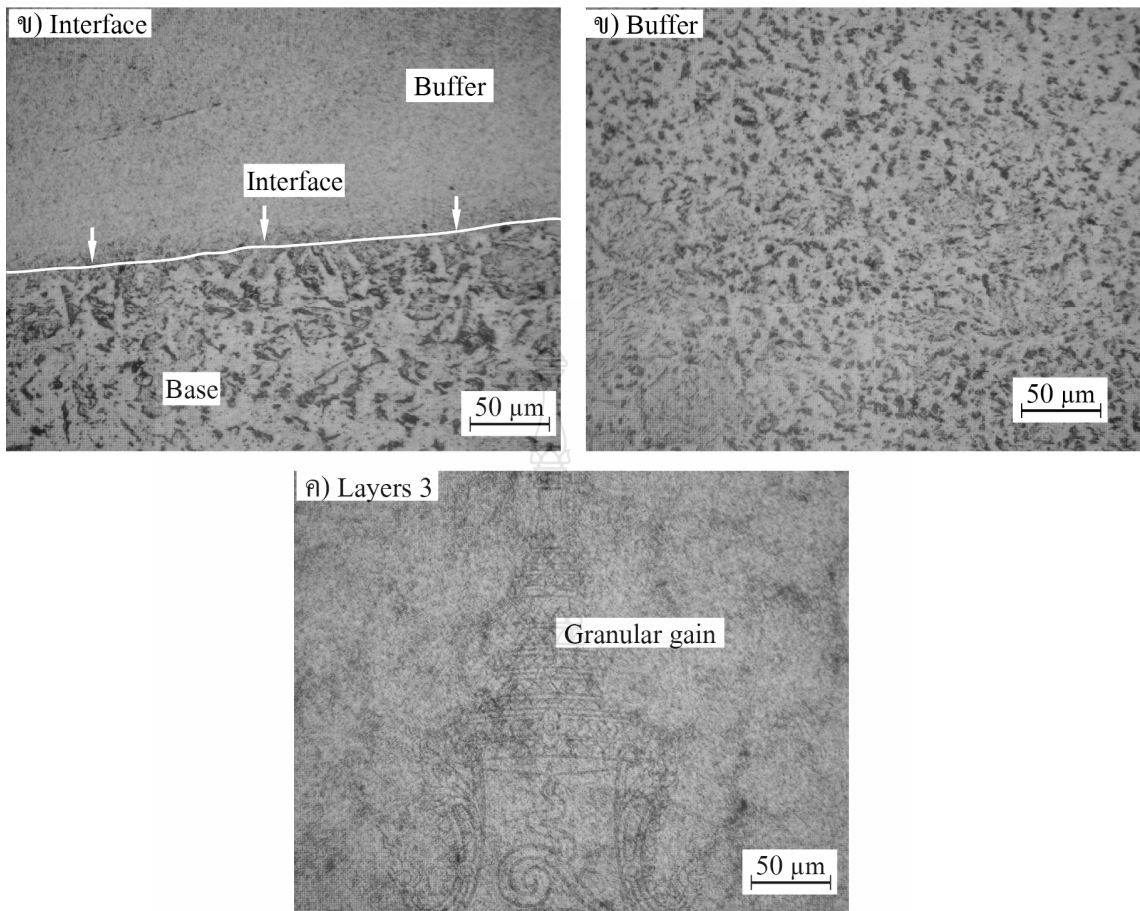
รูปที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบความแข็งจุลภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งเปรียบเทียบ ชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Heat Treatments) 3 รอบ แบบมีชั้นรองพื้นและแบบไม่มีชั้นรองพื้น พบว่า บริเวณ โลหะชิ้นงาน (BM) มีค่าความแข็งบริเวณ โลหะชิ้นงานสูงประมาณ 450-480 HV และบริเวณชั้นรองพื้นมีค่าประมาณ 350 HV และที่บริเวณชั้นแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนแบบมีชั้นรองพื้นและแบบไม่มีชั้นรองพื้นมีค่าแนวโน้มของความแข็งสูงตามจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับชิ้นงานพอกผิวแข็งที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนมีค่าความแข็งสูงกว่าของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 อยู่ที่ประมาณ 723 HV แสดงดังในรูปที่ 4.5 สาเหตุที่ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนมีค่าความแข็งต่ำกว่านั้น Yan, Güngör et al. [29] ได้อธิบายสาเหตุว่าเป็นการสูญเสียปริมาณของคาร์บอนที่ลดลงและประกอบกับโครงสร้างมีความละเอียดสม่ำเสมอ

รูปที่ 4.16 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มีชั้นรองพื้น พบว่าโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเฟอร์ไรต์ละเอียด (Acicular ferrite) แสดงดังลูกศรชี้ในรูปที่ 4.14 (ก) การเกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์ละเอียดคาดว่าส่งผลทำให้ค่าความแข็งสูงกว่าบริเวณ โลหะชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนดังในรูปที่ 4.15 และสอดคล้องกับงานวิจัยของ [35] ที่แสดงโครงสร้างเฟอร์ไรต์ละเอียดที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 และเมื่อ

ตรวจสอบบริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างโลหะชิ้นงานกับโลหะพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.16 (ข) พบว่าที่บริเวณโลหะชิ้นงานเข้าใกล้อินเทอร์เฟซโครงสร้างมีความละเอียดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.8 ขณะที่บริเวณตำแหน่งที่ตรวจสอบ (ค) บริเวณชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 พบว่าโครงสร้างของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนมีการกระจายตัวของเฟสสีขาวและเฟสสีดำสม่ำเสมอ และคาดว่ามีความขอบเกรนที่ใหญ่ขึ้นส่งผลต่อค่าความแข็งลดลงแสดงดังในรูปที่ 4.16 (ค) ของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนและยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yan, Güngör et al. ได้อธิบายชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมส่งผลต่อค่าความแข็งลดลง

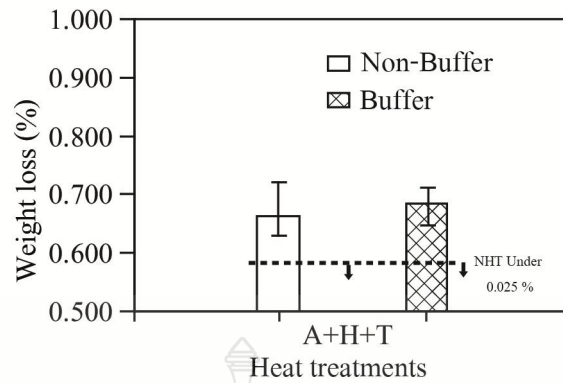


รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มีชั้นรองพื้น กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีชั้นรองพื้น กำลังขยาย 200 เท่า

รูปที่ 4.17 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีชั้นรองพื้น พบว่า บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างชั้นรองพื้นกับโลหะชิ้นงานมีความแตกต่างกันเมื่อผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง กล่าวคือ ที่บริเวณ โครงสร้างของโลหะชิ้นงานมีลักษณะเป็น โครงสร้างพื้นสีขาวสว่างมากกว่าโครงสร้างพื้นสีดำแสดง ขณะที่บริเวณทางด้านชั้นรองพื้นมีการกระจายตัวโครงสร้างสม่ำเสมอและละเอียดทั่วทั้งบริเวณชั้นรองพื้นดังในรูปที่ 4.17 (ก) และ (ข) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้นแบบมีชั้นรองพื้นที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนลักษณะของโครงสร้างจะเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ และเมื่อตรวจสอบชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 แสดงดังในรูปที่ 4.17 (ค) พบว่าโครงสร้างของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนมีการกระจายตัวของเฟสสีขาวและเฟสสีดำสม่ำเสมอและคล้ายกับรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูญหายของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น แบบไม่มีชั้นรองพื้น และมีชั้นรองพื้นที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 210 A ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (NHT = ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน)

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูญหายของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น แบบไม่มีชั้นรองพื้นและมีชั้นรองพื้นที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 210 A ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน พบว่า ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีชั้นรองพื้นให้ค่าความต้านทานการสึกหรอต่ำกว่า ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มีชั้นรองพื้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนจะให้ค่าความต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่า



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อความแข็งชั้นพอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C เชื่อมอาร์กถวดไส้ฟลักซ์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

- 1). กระแสและจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้มีค่าแนวโน้มของค่าความแข็งจุลภาคสูงขึ้นตามจำนวนชั้นพอกผิวแข็งและค่าความแข็งจุลภาคสูงสุดคือแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3
- 2). การปรับปรุงสมบัติทางความร้อนส่งผลต่อชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง เช่น การแตกร้าวและการบิดแอ่นตัว และการบิดแอ่นตัวมีค่าสูงประมาณ 2.8 mm คือ การผ่านกระบวนการทางความร้อน 3 รอบ
- 3). ชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนมีค่าความแข็งสูงกว่าชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน
- 4). การเพิ่มขึ้นหรือลดลงปริมาณของโครงสร้างจุลภาคเฟสสีขาวและเฟสสีดำก่อนและหลังกระบวนการทางความร้อนประกอบไปด้วยธาตุโครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) ซิลิกอน (Si) โมลิบดีนัม (Mo) และวานาเดียม V ส่งผลต่อค่าความแข็ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองทำการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อความแข็งแรงชั้นพอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C เชื่อมอาร์กกลวดไส้ฟลักซ์ เกิดปัญหาในระหว่างการทดลองจึงต้องมีการปรับปรุงหรือใช้ในการทดลองในคราวต่อไป โดยมีข้อเสนอแนะไว้ในการพิจารณาดังนี้

5.2.1 ในการทดลองศึกษาครั้งต่อไปควรทดลองเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมที่หลากหลายที่เป็นกระบวนการเชื่อมที่ใช้กันโดยแพร่หลายในปัจจุบันเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลต่อ และโครงสร้างจุลภาคต่อตัวแปรในกระบวนการเชื่อมตัวอื่น ๆ

5.2.2 ในระหว่างการเชื่อมเกิดกระแสไฟไม่คงที่เนื่องจากลักษณะการใช้ไฟของโรงงานไม่สมดุลย์ เกิดไฟตก ทำให้การอาร์กของชิ้นงานเกิดข้อขัดข้องของกระแสไฟส่งผลต่อการหลอมละลายในระหว่างการอาร์กในการเชื่อม

5.2.3 ในการทดลองศึกษาครั้งต่อไปควรมีการเพิ่มหรือลดความเร็วในการเดินแนวเชื่อมเพื่อเปรียบเทียบและศึกษาค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อม



บรรณานุกรม

- [1] Yawata, *Yawata(online)*, 2015, Available: www.yawata.co.th/products, 20 January 2015
- [2] C. Zhang, X. Song, P. Lu, and X. Hu, "Effect of microstructure on mechanical properties in weld-repaired high strength low alloy steel," *Materials & Design*, vol. 36, pp. 233-242, 4 April 2012.
- [3] V. E. Buchanan, P. H. Shipway, and D. G. McCartney, "Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry," *Wear*, vol. 263, pp. 99-110, 9 October 2007.
- [4] S. Chatterjee and T. K. Pal, "Solid particle erosion behaviour of hardfacing deposits on cast Iron Influence of deposit microstructure and erodent particles," *Wear*, vol. 261, pp. 1069-1079, 30 November 2006.
- [5] S. Chatterjee and T. K. Pal, "Weld procedural effect on the performance of iron based hardfacing deposits on cast iron substrate," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 173, pp. 61-69, 30 March 2006.
- [6] R. Arabi Jeshvaghani, E. Harati, and M. Shamanian, "Effects of surface alloying on microstructure and wear behavior of ductile iron surface-modified with a nickel-based alloy using shielded metal arc welding," *Materials & Design*, vol. 32, pp. 1531-1536, 3 March 2011.
- [7] F. Malek Ghaini, M. Ebrahimnia, and S. Gholizade, "Characteristics of cracks in heat affected zone of ductile cast iron in powder welding process," *Engineering Failure Analysis*, vol. 18, pp. 47-51, 1 January 2011.
- [8] S. Selvi, S. P. Sankaran, and R. Srivatsavan, "Comparative study of hardfacing of valve seat ring using MMAW process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 207, pp. 356-362, 16 October 2008.
- [9] I. Hemmati, V. Ocelik, and J. T. M. De Hosson, "Dilution effects in laser cladding of Ni-Cr-B-Si-C hardfacing alloys," *Materials Letters*, vol. 84, pp. 69-72, 1 October 2012.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [10] K. Yang, S. Yu, Y. Li, and C. Li, "Effect of carbonitride precipitates on the abrasive wear behaviour of hardfacing alloy," *Applied Surface Science*, vol. 254, pp. 5023-5027, 15 June 2008.
- [11] D. Liu, R. Liu, Y. Wei, Y. Ma, and K. Zhu, "Microstructure and wear properties of Fe–15Cr–2.5Ti–2C–xB wt.% hardfacing alloys," *Applied Surface Science*, vol. 271, pp. 253-259, 15 April 2013.
- [12] X.-h. Wang, F. Han, S.-y. Qu, and Z.-d. Zou, "Microstructure of the Fe-based hardfacing layers reinforced by TiC-VC-Mo₂C particles," *Surface and Coatings Technology*, vol. 202, pp. 1502-1509, 1 January 2008.
- [13] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian, G. Madhusuhan Reddy, and K. Sivakumar, "Effect of buttering and hardfacing on ballistic performance of shielded metal arc welded armour steel joints," *Materials & Design*, vol. 32, pp. 469-479, 2 January 2011.
- [14] M. F. Buchely, J. C. Gutierrez, L. M. León, and A. Toro, "The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys," *Wear*, vol. 259, pp. 52-61, 7 July 2005.
- [15] J. J. Coronado, H. F. Caicedo, and A. L. Gómez, "The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits," *Tribology International*, vol. 42, pp. 745-749, 5 May 2009.
- [16] D.R. Askeland and P.P. Phule, *Science and Engineering of Materials*. Singapore: Cengage Learning, 5 May 2006.
- [17] Japanese Standards Association, "*JIS Handbook Ferrous Materials&Metallurgy I: JIS G 4051 (1979)*," ed: Japan: Japanese Standards Association, 1996, pp. 517-523, 7 July 2005.
- [18] มานะศิษย์ พิภพสาร, การเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุม. คู่มือการเชื่อม มิก-แม็ก. กรุงเทพฯ: เอ็ม แอนคี่, 2554.
- [19] ASM Metals Handbook *Welding Brazing and Soldeing* vol. 06, 1993.
- [20] สมบูรณ์ เต็งหงษ์เจริญ, การเชื่อมพลาสมา. สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตเทคนิค กรุงเทพฯ. กรุงเทพฯ, 2542.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [21] ESAB, *The use of buffer layers and build-up layers*. n.p., n.d.
- [22] สมบูรณ์ เต็งหงษ์เจริญ, การเชื่อมพอกผิวแข็ง. เอกสารคำสอนกระบวนการเชื่อม. สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ : กรุงเทพฯ 2542.
- [23] นิตินทร นรภัยพิพาษา, "ผลกระทบของอุณหภูมิผิวสัมผัสที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของอ็อกไซด์เรซินเติมซิลิกาบัด," วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี, 2554.
- [24] Focuslab, Focuslab(online), 2015, Available: www.focuslab.co.th/en/home.php, 10 March 2015
- [25] ชูชาติ ด้วงสงค์, การทดสอบงานเชื่อมแบบทำลายสภาพ, 3 ed. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น) กทม, 2555.
- [26] Annual Book of ASTM Standards, "Volume 03.01 Metals -- Mechanical Testing; Elevated and Low-Temperature Tests; Metallography, Standard Practice for Microetching Metals and Alloys E407," in *Section 3 - Metals Test Methods and Analytical Procedures*, ed, 10 October 1999.
- [27] A. M. Handbook, "Metallography and Microstructures," in *Vol 09* ed, 2004.
- [28] Winarto and D. Priadi, "Effect of Preheating and Buttering on Cracking Susceptibility and Wear Resistance of Hardfaced HSLA Steel Deposit," *QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY*, vol. 31, pp. 202s-205s, 15 November 2013.
- [29] P. Yan, Ö. E. Güngör, P. Thibaux, M. Liebeherr, and H. K. D. H. Bhadeshia, "Tackling the toughness of steel pipes produced by high frequency induction welding and heat-treatment," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, pp. 8492-8499, 15 November 2011.
- [30] S. Celik and I. Ersozlu, "Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and AISI 1050 steels," *Materials & Design*, vol. 30, pp. 970-976, 4 April 2009.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [31] F. Molleda, J. Mora, J. R. Molleda, E. Mora, and y. B. G. Mellor, "The importance of spatter formed in shielded metal arc welding," *Materials Characterization*, vol. 58, pp. 936-940, 10 October 2007.
- [32] K.-C. Tsai, S.-L. Jeng, and J.-Y. Huang, "Prevention of delayed cracking of iron based hardfacing welds," *Engineering Failure Analysis*, vol. 48, pp. 210-217, 2 February 2015.
- [33] Y. Wang, J. Chen, J. Yang, F. Hao, T. Dan, Y. Yang, *et al.*, "Effect of La₂O₃ on granular bainite microstructure and wear resistance of hardfacing layer metal," *Journal of Rare Earths*, vol. 32, pp. 83-89, 1 January 2014.
- [34] P. B. Srinivasan, V. Muthupandi, W. Dietzel, and V. Sivan, "An assessment of impact strength and corrosion behaviour of shielded metal arc welded dissimilar weldments between UNS 31803 and IS 2062 steels," *Materials & Design*, vol. 27, pp. 182-191, 7 May 2006.
- [35] C. R. N. Nunura, C. A. dos Santos, and J. A. Spim, "Numerical – Experimental correlation of microstructures, cooling rates and mechanical properties of AISI 1045 steel during the Jominy end-quench test," *Materials & Design*, vol. 76, pp. 230-243, 7 May 2015.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



โครงการประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่

“ การศึกษาเชิงสร้างสรรค์ ทักษะปัญญาสู่อาเซียน ”

โครงการเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี
เนื่องในโอกาสทรงเจริญพระชนมายุ ๖๐ พรรษา

The Graduate School, Silpakorn University

วันที่ 16-17 กรกฎาคม 2558 ณ ศูนย์มานุษยวิทยาสิรินธร (องค์การมหาชน) ดอนเมือง กรุงเทพฯ

๕

The 5th National and International Graduate Study Conference 2015
“Creative Education Intellectual Capital toward ASEAN”

N

IGSC 2015

ดร.จักรี ไชยพินิจ

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมณัญญ์ มิ่งศิริธรรม
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูชาติ พ่วงสมจิตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสาวณิต วิงวอน
 ดร.กนิษฐา เขาวัดนกุล

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
 ดร. สุวภัทร ศรีจางแสง

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
 ดร.สุจินดา ไท้อึ้งเพ็ญ

มหาวิทยาลัยชินวัตร
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลาวัณย์ฉวี สุจริตตานนท์

กรมศิลปากร
 ดร.อมรา ศรีสุชาติ
 ดร.ภัคพดี อยู่คงดี
 อาจารย์วันทนี ม่วงบุญ
 นายอรุณศักดิ์ กิ่งมณี
 นายประทีป เพ็งตะโก
 นายนิติ แสงวันฉวี

ศูนย์มานุษยวิทยาสิรินธร
 ดร.สมรภัช ชัยสิงห์กานานนท์

สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน
 กระทรวงศึกษาธิการ
 ดร.โชติมา หนูพริก

❖ **กลุ่มวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี**

มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 อาจารย์ ทญพ.วิไลพร สุตน์ไชยนนท์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีสมพร ปรีเปรม
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จงรัชต์ หงษ์งาม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทญ.ดร.ชุตินา ระติสุนทร
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยวงค์
 ดร.ชาญกิจ พุฒิเลอพงศ์
 ดร.จิตติมา วัฒนวิจิตรกุล

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รมิดา ศรีเหรา
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราฤทธิ์ พานิชกิจโกศลกุล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 รองศาสตราจารย์ ดร.อนุพันธ์ เทอดดวงศ์วรกุล
 รองศาสตราจารย์ ดร. อนุวัตร แจ่มชัด
 รองศาสตราจารย์ ดร. สุนทร สุวรรณลิขณณ์
 รองศาสตราจารย์ ดร.ปาริฉัตร หงสประภาส
 รองศาสตราจารย์ ดร.สมจิต สุรพัฒน์
 รองศาสตราจารย์ ดร.ก้านรงค์ ศรีรอด
 รองศาสตราจารย์ ดร.สิริ ชัยเสรี
 รองศาสตราจารย์ ดร. พูนพิภพ เกษมทรัพย์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รณฤทธิ์ ฤทธิธรม
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ บัวเลิศ
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาศอุบล ทองงาม
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร ตรงจิตภักดี
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตศิริ ราชตะนะพันธ์
 ดร. นื่องนุช ศิริวงศ์
 นางจุฬาลักษณ์ จารุณช
 สำนักงานตำรวจแห่งชาติ
 พ.ต.ท.กฤษฏา ธิบรัมย์ทรัพย์
 พ.ต.ท.หญิงภัทราพร อมรไชย
 โรงเรียนนายร้อยตำรวจ
 รองศาสตราจารย์ พ.ต.อ.นพพรศักดิ์ศิริ
 พ.ต.ท.ดร.สฤกษ์ สืบพงษ์ศิริ
 วิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนี
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีณยา ไชยสิทธิ์มงคล
 ดร.จินตมาศ โกลชัยวิจิตร
 ดร.พนารัตน์ วิศวะเทพนิมิตร
 ดร.จินตนา ไพบูลย์ธนานนท์
 ดร.ศรีรัตน์ ศรีประสงค์
 ดร.สุภาพร วรรณสันทัด
 ดร.วรรณิ ตบนิยากร
 ดร.กรกนก ล้อธนนท์
 อาจารย์เจียมใจ ศรีชัยรัตนกุล

มหาวิทยาลัยมหิดล
 รองศาสตราจารย์ ทพญ.ประภาศรี วิรัตน์พงษ์

รองศาสตราจารย์ ทพญ.ประกาศี วิรัตน์พงษ์
รองศาสตราจารย์ ทพ. ดร. อรนาฎ มาตั้งคสมปัติ
รองศาสตราจารย์ ทพ.ดร. กิตติ ต. รุ่งเรือง
รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจภรณ์ ประภักดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เบญจพร สุขประเสริฐ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิไลพรรณ สมบุญตนนท์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีณยา โฉลิตะมงคล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทพ. ชุชัย อนันต์มานะ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทพญ. ดวงดี รั่มมะศักดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทพญ.เบญจมาศ อภิพันธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพ.ทพ.ศิริชัย เกียรติถาวรเจริญ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพ.ทพ. เกียรติอนันต์ บุญศิริเศรษฐ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัจฉราพร ขำโสภา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จารุวรรณ วงศ์ทะเลนตร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอื้อมพร มีชัยมวงศ์
ดร.ศรีรัตน์ ศรีประสงค์
ดร.วันันท์ มัตติทานนท์
ดร. กันต์ ปานประยูร
ดร.ทพญ. ตรีนุช เอี่ยมพงษ์โพบลย์
ดร.ทพ. ศุภกันต์ ทิศทวีรัตน์
ดร.ทพญ. พวงวรรณ ลาภธนทรัพย์กุล
ดร.ทพ. สุพัฒชัย บุญประสมภัก
ทพญ.ชุตินา ออมรพิทักษ์กุล
ทพ. ราชัย จึงสมจิตต์
ทพ. พงศธร นูห์ทองคำ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ดร.รัมภา จุฑะกนก
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ดร.นพตล ชลอรรถรม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร. สายัญ สดุดี
มหาวิทยาลัยราชภัฏสมเด็จพระเจ้าพระยา
ดร.จุมพฏ ภาณุจนกัธรา
โรงพยาบาลพุทธโสธร
ดร.วราภร เกียรติเกรศักดิ์
มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร. ปานใจ ธารทัศน์วงศ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา ลีมีมหาภริณี
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรศักดิ์ โจรนราธา
รองศาสตราจารย์ ดร.นลินี พูลทรัพย์
รองศาสตราจารย์ ดร.กัมพรชัย ศรีพงศ์พันธุ์
รองศาสตราจารย์ ดร.มัลลิกา ปัญญาคะโป
รองศาสตราจารย์ ดร.มลิวรรณ บุญเสนอ
รองศาสตราจารย์ มาณพ ปานะโปย
รองศาสตราจารย์ ดร.พรทิพย์ ศรีแดง
รองศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณณี ฉายะบุตร
รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยาณี จิรศรีพงศ์พันธุ์
รองศาสตราจารย์ ดร.กนกพร สว่างแจ้ง
รองศาสตราจารย์ มาณะ ภาณุจนามณีเสถียร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุษบา เผ่าทองจีน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต สิทธิสมบัติ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุรีย์ เจริญธีรบูรณ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตติ ยงฉวีชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทิธา สรรพณี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ กิ่งผดุง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทร์ สุขแสน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตติพงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศุภชัย วาสนานนท์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จันทร์เพ็ญ อนุรัตน์านนท์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศิริวงศ์วิไลชาติ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพล เกียรติกิตติพงษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิดินทร์ แสงสว่าง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญดา เพ็ญโรจน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภวรรณ รัตสุข
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลชนก พานิชการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชฎา บุญเต็ม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนาถ สุนทรวัฒน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรงค์ นิรมพาลี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรัญ วสันตภรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณฤฎิกา เสี่ยงสาย	ดร. กัญจนา ทองสนิท
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ คูวิจิตรจางู	ดร. ชูศักดิ์ พรสิงห์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดิเรกฤทธิ์ บัวเวช	ดร.ยรรยงค์ พันธุ์สวัสดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	ดร.ณพงศ์ ปณีธานธรรม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต อินดวงค์	ดร.ศราวุธ ภูโฆจิตรกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย	ดร.อุทมา เจวจินดา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณศรี ลีจรรย์เนียร	ดร.สินี หนองเต่าดำ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศราภรณ์ มหาโยธี	ดร. วรฤทัย ชูเกียรติ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูเกียรติ สอดศรี	ดร.คณิศ พลอยคณีย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรประภา ภูมะพะกาญจนะ	ดร.รุจิกัญญา นานาสิท
โรแบร์	ดร.ณัฐ อธิยะพงษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุปจน์ บุรทุกุลศรี	ดร.ธัชพงศ์ ชูศรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมจิตร ลากโนนเขวา	ดร. ไพโรจน์ ขาวลิตวิวงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุขุม โฆษิตชัยมงคล	ดร. เนาวรัตน์ มีจันทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วันชัย ลีลากวิวงศ์	ดร.งามจิตต์ เขียวกุลประเสริฐ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ	ดร.วรภาส พรมเสน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิฑูพล อันเนื่อง	ดร.ดาวรุ่ง สั้งข์ทอง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนวัช บุญญภักดิ์	ดร.อรอนงค์ แจ่มเล็ก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิตศักดิ์ พุดจระ	ดร.กนก หวลกำเนิด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สัตวแพทย์หญิง-	ดร.กานพงศ์ พรหมมารัตน์
ดร. จารุณี เกษรพิกุล	ดร. ภวพล คงชุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประทีป ดั่งแค	ดร. แก้วตา ลิ่มเอ็ง
ดร. อรวรรณ เขาวลิต	ดร. เสาวภา เขียนงาม
ดร. บุญญาภา หวังวัฒนา	ดร. ปณิดา ดวงแก้ว
ดร. ลาวลัย เชียงจิ่ง	ดร. สุภาวดี ฉิมทอง
ดร. วารณี บุญช่วยเหลือ	ดร. สุภาวดี มานะไตรนันท์
ดร. จิติ ญาณปรีชาเศรษฐ์	ดร. อนันท์ เขาว์เครือ
ดร. วิชิต อิมอารมณ	ดร. วีไลวรรณ สิริโรจนพุดิ
ดร. ศุภชัย ศุภลักษณ์นารี	น.สพ. ดร. นรินทร์ ปรียวิษณุภักดิ์
ดร. ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง	ดร. จิตติมา เวชพงษ์
ดร. สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์	ดร. ศุภชัย อำคา
ดร. กมล ศิลาพันธ์	ดร. สรารัตน์ มนต์ขลัง
ดร. สุตศิริ เหมศรี	อาจารย์ วิชัย จันทร์รักษา
ดร. ลีทธิชัย แจ่มหล่ม	อาจารย์ กวินธร สัยเจริญ
ดร. วรฤทัย ชูเกียรติ	อาจารย์พรชัย เปลี่ยมทรัพย์

ชื่อ-นามสกุล	ชื่อบทความ	เลขหน้า
ดวงกมล ดีทองคำ	ความสัมพันธ์ระหว่างอาการภายหลังสมองได้รับการกระทบกระเทือนกับการปฏิบัติหน้าที่ของผู้พยาบาลเจ็บที่ศีรษะระดับเล็กน้อย	3093
ดวงรัตน์ คุ่มภัย	การพัฒนาแนวคิดของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 เรื่อง สมดุลเคมีโดยใช้การจัดการเรียนรู้แบบเสาะหาความรู้	3108
ดิตรกร ก้อนตะเสน	การตัดสินใจคัดเลือกอุปกรณ์ออปติคอลเน็ตเวิร์คยูนิค (ONU) โดยใช้กระบวนการตัดสินใจแบบวิเคราะห์ลำดับขั้น	3121
ตฤณภพ บุญเส็ง	แบบจำลองและการจำลองระบบไฟฟ้าสำหรับการขนส่งทางรางเพื่อใช้ในการศึกษา คุณภาพกำลังไฟฟ้า	3136
ดวงพร อินทจักร	กระบวนการทางชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนในปัสสาวะ	3148
ทรงโชค กล้าแข็ง	ตัวแบบสำหรับช่วยออกแบบแคชด้วยวิธีการทางเหมืองข้อมูล	3158
ทิตยพร ดีคำ	การออกแบบระบบเคลื่อนย้ายยาพอลิเมอร์สำหรับผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์	3169
ธนจิรพัชร พัฒนศักดิ์ภิญโญ	สภาพปัญหาของระบบการผลิตยางพาราและข้อเสนอแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหายางพาราในจังหวัดพิษณุโลก	3179
ธนพร เลิศบัวสิน	การออกแบบระบบการจัดการสินค้าคงคลัง กรณีศึกษา โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์	3191
ธนศาล คำเรืองฤทธิ์	การศึกษา การรับรู้ และการให้คุณค่าของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์นมพร้อมดื่มคุณภาพดีจากโคนมพันธุ์ไกรีนชี	3205
ธัญชกร ช่วยท้าว	ผลของโปรแกรมสนับสนุนการจัดการตนเอง ในผู้เป็นโรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง ต่อความรู้ พฤติกรรมการจัดการตนเอง อาการหายใจลำบาก และสมรรถภาพปอด	3220
ธราวพร กัปโก	อิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อความแข็งแรงของพอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C เชื่อมอาร์กวดใส่ฟลักซ์	3234

อิทธิพลของการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนที่มีผลต่อความแข็งชั้นพอกแข็งเหล็กกล้า
คาร์บอน JIS S50C เชื่อมอาร์กกลวดไส้ฟลักซ์

**Influence of Heat Treatment on Hardfacing Layers Hardness Carbon Steel JIS
S50C Flux Cored Arc Weld**

ชราพร กัปโก^{1*}, เจษฎา แก้ววิจิตร², กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน หลังการเชื่อมอาร์กกลวดไส้ฟลักซ์ที่มีผลต่อสมบัติของแนวเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลและ โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง ก่อนและหลังกระบวนการทางความร้อน ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนหลังการเชื่อมมีความไม่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับแนวเชื่อมพอกแข็งเนื่องจากส่งผลต่อการเสียรูปของโลหะชิ้นงานและทำให้เกิดการแตกร้าวขนาดใหญ่ที่ขอบเขตระหว่างพื้นที่กระทบ ร้อนและโลหะชิ้นงาน การบิดตัวสูงสุดของโลหะชิ้นงานมีค่าประมาณ 2.8 mm เมื่อทำการการ ปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน 3 รอบ ชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนมีค่า ความแข็งสูงประมาณ 703 HV ในชั้นที่ 3 และมีค่าสูงกว่าชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความ ร้อน การเปลี่ยนแปลงปริมาณของโครงสร้างจุลภาคเฟสสีขาวและเฟสสีดำประกอบไปด้วย ธาตุโครเมียม แมงกานีส ซิลิกอน โมลิบดีนัม และวานาเดียม เนื่องจากการปรับปรุงสมบัติด้วยความ ร้อนหลังการเชื่อมส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของโลหะเชื่อมพอกแข็ง

คำสำคัญ: เชื่อมอาร์กกลวดไส้ฟลักซ์, ชั้นพอกแข็ง, การปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน

Abstract

This research aimed to study an effect of a post weld heat treatment on JIS-S50C hard-faced layer properties produced by a flux-cored arc welding and to study a relation between mechanical properties and microstructure of a weld metal that was pre- and post-weld heat treated. The summarized results are as follows. Post weld heat treatment (PWHT) was not required for the hard-faced layer on base metal because it affected to distort the base metal shape

and produced a large crack at the interface between HAZ and base metal. The maximum distortion of the base metal was about 2.8 mm when 3 cycles of post weld heat treatment were applied to the hard-faced weld metal. 3rd layers of the no-PWHT weld metal indicated the hardness of 703 HV that was higher than that of the 3rd layers of PWHT weld metal. Variation amount of white and grey phases that were included of chromium, silicon, molybdenum and vanadium due to PWHT affected to vary the hardness of the hard-faced weld metal.

Keywords : Flux cored arc welding, Hardfacing layer, Heat treatment

บทนำ

อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ โดยมีคัสตอมเมอร์เป็นชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลในการผลิตน้ำตาล ส่วนมากเกิดการเสียหายจากการสัมผัส ชัด และเสียดสี กับชิ้นส่วนต่างๆ จึงส่งผลทำให้ชิ้นส่วนเกิดการสึกหรอและมีขนาดของชิ้นส่วนลดลง ส่งผลให้ลดประสิทธิภาพในการทำงานลดลงหรือชำรุดเสียหาย หากมีวิธีการในการนำเอาชิ้นส่วนเก่าที่สึกหรอกลับมาใช้ใหม่โดยการซ่อมแซมและปรับปรุงส่วนที่สึกหรอ อาจทำให้ต้นทุนการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลลดลงได้

การเชื่อมพอกแข็งเป็นการเชื่อมซ่อมที่สามารถเพิ่มเติมเนื้อ โลหะและเพิ่มความแข็งให้กับโลหะหลัก โดยสามารถทำได้ด้วยกระบวนการเชื่อมหลายวิธี เช่น การเชื่อมพอกแข็งเพื่อซ่อมชิ้นส่วนแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่นบางด้วยวิธีการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas Welding: TIG Welding) หรือการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมการเชื่อมอาร์กหลอดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการเชื่อมอาร์กหลอดเชื่อมหุ้มฟลักซ์อาจมีความเหมาะสมมากกว่า เนื่องจากการเชื่อมอาร์กหลอดหุ้มฟลักซ์เป็นวิธีการเชื่อมที่ง่าย อุปกรณ์การเชื่อมไม่ยุ่งยากซับซ้อน และราคาต่อหน่วยของเครื่องเชื่อมต่ำ นอกจากนี้หากเปรียบเทียบเกรดของลวดเชื่อมแล้วพบว่าลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกแข็งที่มีในอุตสาหกรรมงานเชื่อมส่วนใหญ่เป็นลวดเชื่อมที่ผลิตออกมาเพื่อวิธีการเชื่อมอาร์กหลอดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ดังนั้นการเชื่อมอาร์กหลอดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกแข็งจึงอาจเป็นวิธีการเชื่อมที่มีความเหมาะสมในการนำมาเชื่อมซ่อมส่วนที่สึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ที่ผ่านมาพบว่ามีการเชื่อมอาร์กพอกแข็งวัสดุหลายชนิดและให้สมบัติของผิวพอกแข็งดังต้องการ เช่น เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High Strength Low Alloy: HSLA) เหล็กหล่อสีเทา (Grey cast iron) (Buchanan, Shipway et al. 2007, Zhang, Song et al. 2012) เหล็กหล่อเหนียว (Chatterjee and Pal 2006) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Arabi Jeshvaghani, Jaberzadeh et al. 2014) เหล็กกล้าผสมหรือเหล็กพิเศษอื่นๆ (Buchely, Gutierrez et al. 2005, Coronado, Caicedo et al. 2009)

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีกรอบแนวคิดในการนำเอาเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C ที่ผ่านการเชื่อมพอกแข็งด้วยวิธีการเชื่อมอาร์กหลอดใส่ฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding Process) มาทำการปรับปรุงสมบัติ

ด้วยความร้อน และทำการศึกษเปรียบเทียบสมบัติ เช่น ความแข็งและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อมพอกแข็งที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนที่วัฏจักรความร้อนต่างๆ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

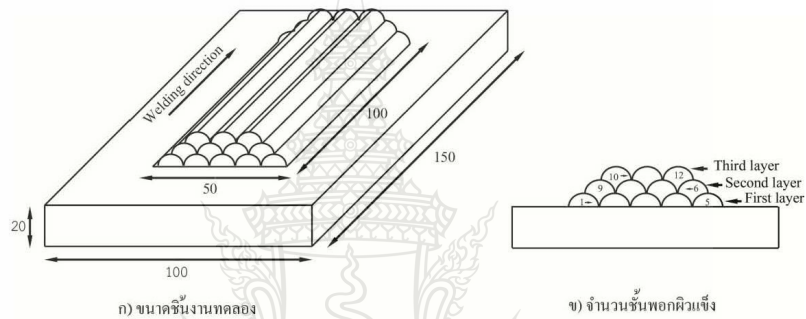
1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของรอบการให้ความร้อนการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนที่มีผลต่อสมบัติของชั้นพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C ที่เชื่อมด้วยการเชื่อมอาร์กถวดไส้ฟลักซ์
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C

วิธีการวิจัย

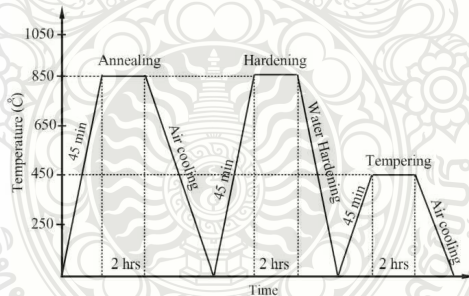
วัสดุที่ใช้ในทดลอง คือ เหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C มีขนาดกว้าง 100 mm ยาว 150 mm และหนา 20 mm ตามมาตรฐานชิ้นงานเชื่อม JIS Z 3114 โดยมีส่วนผสมทางเคมีแสดงในตารางที่ 1 ผิวหน้าชิ้นงานถูกขัดละเอียดด้วยหินเจียรในรบบก่อนเชื่อมโดยชิ้นงานถูกจับยึดบนอุปกรณ์จับยึดและใช้ถวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux cored wire arc welding) ชนิดพอกแข็งตามมาตรฐาน DIN 8555: MF-6-GF-60-GP ส่วนผสมทางเคมีแสดงดังในตารางที่ 1 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 mm จำนวนชั้นในการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น (Winarto and Priadi 2013) ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) โดยกำหนดชั้นที่ 1 เชื่อมพอกแข็งจำนวน 5 แนวเชื่อม รอยต่อขอบของแนวเชื่อมแต่ละแนวต่อชน ชั้นที่ 2 เชื่อมพอกแข็งจำนวน 4 แนวเชื่อม (Winarto and Priadi 2013) แต่ละแนวเชื่อมทับซ้อนกันระหว่างรอยต่อขอบของแนวเชื่อมที่ 1 กับ แนวเชื่อมที่ 2 ของชั้นที่ 1 และชั้นที่ 3 เชื่อมพอกแข็งจำนวน 3 แนวเชื่อม (Winarto and Priadi 2013) แต่ละแนวเชื่อมทับซ้อนกันระหว่างรอยต่อขอบของแนวเชื่อมที่ 6 กับ แนวเชื่อมที่ 7 ชั้นที่ 2 แสดงดังในรูปที่ 1 (ข) แนวเชื่อมพอกแข็งทั้งหมดมีขนาดกว้าง 50 mm ยาว 100 mm ตามมาตรฐาน JIS Z3114 เชื่อมในท่าราบ (Flat Position) มีระยะห่างระหว่างแนวเชื่อมเฉลี่ย 10 mm และมีอุณหภูมิระหว่างที่ยิวเชื่อม (Interpass temperature) ไม่ต่ำกว่า 150°C (Gualco, Svoboda et al. 2010) โดยกำหนดกระแสเชื่อม 210 A ความเร็วเดินแนว 150 mm/min และทำการเชื่อมพอกแข็งด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กถวดไส้ฟลักซ์ โดยประยุกต์กรรมวิธีการเชื่อมแบบมิกกิ้งอัตโนมัติ ลงบนโลหะชิ้นงาน หลังจากเชื่อมเสร็จปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ จนอุณหภูมิชิ้นงานเชื่อมลดลงถึงอุณหภูมิห้อง ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมนำไปผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน 3 รอบ โดย 1 รอบของการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนประกอบด้วย การอบอ่อน (Annealing)+ การชุบแข็ง (Hardening)+การอบคืนไฟ (Tempering) ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม (As-welded / Non-Heat treatment : NHT) และชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน (Heat Treatment : HT) แสดงดังรูปที่ 2 ไปทำการทดสอบเปรียบเทียบสมบัติทางกล โครงสร้างทางโลหะวิทยา และความแข็งจุลภาค ต่อไป

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C และลวดเชื่อม

Materials	Elements							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
JIS S50C	0.52	0.26	0.78	0.03	0.01	0.19	0.01	0.006
MF-6-GF-60-GP	0.51	0.69	1.83	0.012	0.002	7.017	0.369	0.321



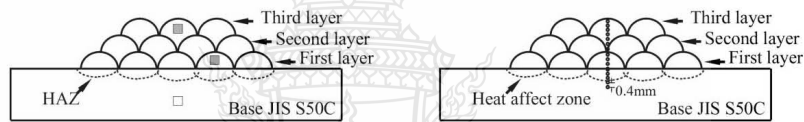
รูปที่ 1 การออกแบบแนวเชื่อมพอกแข็ง



รูปที่ 2 แผนภาพขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน

การทดสอบความแข็ง และการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อมพอกแข็ง ชิ้นงานถูกนำมาทำการตัดเพื่อเตรียมเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องตัดชิ้นงานทดสอบที่มีระบบหมุนเวียนน้ำหล่อเย็น โดยทำการตัดตามขวางตั้งฉากของแนวเชื่อมและทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 240 – 2,000 และขัดละเอียดด้วยผงเพชรบนผ้าสักหลาดจนกระทั่งผิวมันวาวคล้ายกระจก หลังจากนั้นทำการกัดกรด (Etching) ผิวหน้าชิ้นงานเชื่อมด้วยสารละลายที่ประกอบด้วยกรดไนตริก (HNO₃) 20 mm และกรดไฮโดร

คลอริก (HCL) 60 mm ใช้เวลาในการกัดกร่อนประมาณ 5-60 Sec ตามมาตรฐาน ASTM E407 ชิ้นงานที่ผ่านการกัดกร่อนนำไปทำการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light optical microscope) ที่ตำแหน่งการตรวจสอบประกอบด้วยบริเวณ โลหะชิ้นงาน (Base metal) และบริเวณชั้นโลหะเชื่อมที่ 1 ถึง 3 (Weld Metal Layer) แสดงดังในรูปที่ 3 (ก) การทดสอบความแข็งจุลภาคใช้ชิ้นงานที่ผ่านการตัด ชัด และกัดกร่อนเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ใช้ในการตรวจสอบ โครงสร้างทาง โลหะวิทยา และทำการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง ไมโครวิกเกอร์ การทดสอบกระทำในทิศทางตั้งฉากกับแนวเชื่อมในแนวตั้งจากผิวด้านบนของชั้นพอกแข็งที่ 3 ชั้นพอกแข็งที่ 2 ชั้นพอกแข็งที่ 1 บริเวณกระพร้อน และโลหะชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3 (ข) ในการทดสอบความแข็งกำหนดให้ระยะห่างระหว่างของรอยกมมีค่าเท่ากับ 0.4 mm แรงที่ใช้ในการทดสอบ 500 gf และเวลาในการกดแช่ 10 วินาที



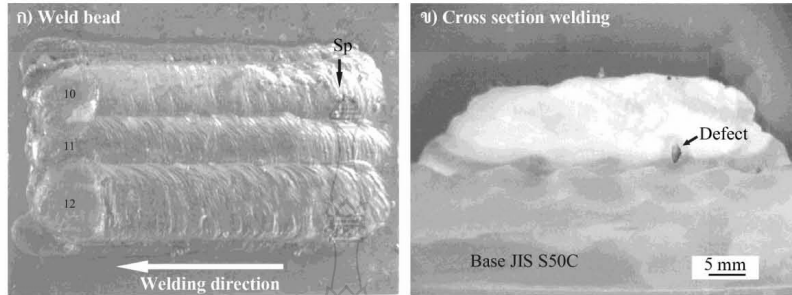
ก) ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ข) ตำแหน่งการทดสอบความแข็งจุลภาค

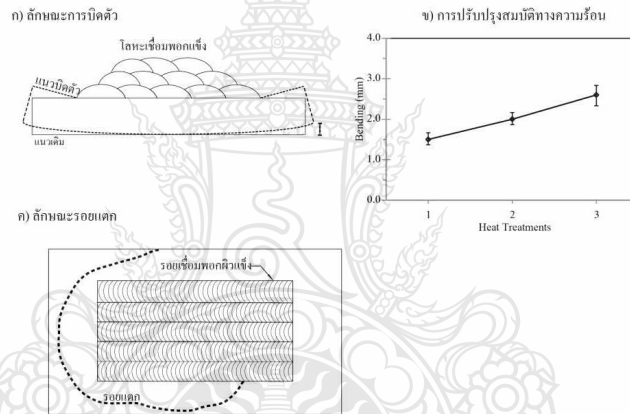
รูปที่ 3 ตำแหน่งการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคและทดสอบความแข็งจุลภาค

ผลการทดลอง

รูปที่ 4 (ก) แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 210 A และเป็นการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ที่แสดงผิวหน้าแนวเชื่อมในชั้นที่ 3 ที่มีความสมบูรณ์ไม่พบจุดบกพร่อง (Defect) ใดๆ เช่น รอยแตก ร้าว ตามคหรือโพรงแก๊ส (Blowhole) บนผิวหน้าแนวเชื่อม อย่างไรก็ตามพบการกระเด็นของเม็ดโลหะ (Spatter) ที่เกิดขึ้นจะเกิดการอาร์คในการเชื่อมบนผิวหน้าแนวเชื่อม 10 ซึ่งเป็นแนวเชื่อมแนวแรกของการเชื่อมพอกแข็งแนวที่ 3 ดังแสดงด้วยอักษร SP เม็ด โลหะที่เกิดขึ้นนี้ไม่บดบังส่งผลทำให้ความขรุขระของผิวหน้าแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นและจำเป็นต้องทำการกำจัดออกก่อนนำไปใช้งาน อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้พิจารณาเป็นสำคัญ แนวเชื่อมพอกแข็งที่ได้จากการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นถูกนำมาทำการเตรียมด้วยวิธีการเตรียมชิ้นงานตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยาและแสดงดัง โครงสร้างมหภาคดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) โครงสร้างมหภาคแสดงการแบ่งพื้นที่ของ โลหะเชื่อมออกเป็นส่วนๆ ชัดเจน นอกจากนั้นพบจุดบกพร่องที่เกิดจากการเชื่อมเป็น โพรงอากาศระหว่าง โลหะเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1 และโลหะชิ้นงานดังแสดงด้วยลูกศรในรูปที่ 4 (ข)



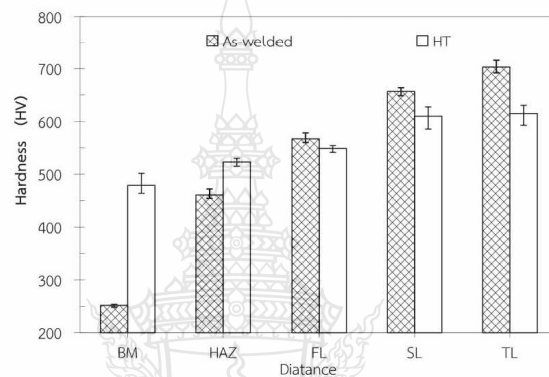
รูปที่ 4 โครงสร้างผลึกของแนวเชื่อมพอกแข็ง (SP=เม็ดโลหะ



รูปที่ 5 รูปจำลองการบิดแ่นตัวและลักษณะรอยแตกชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งที่การปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน

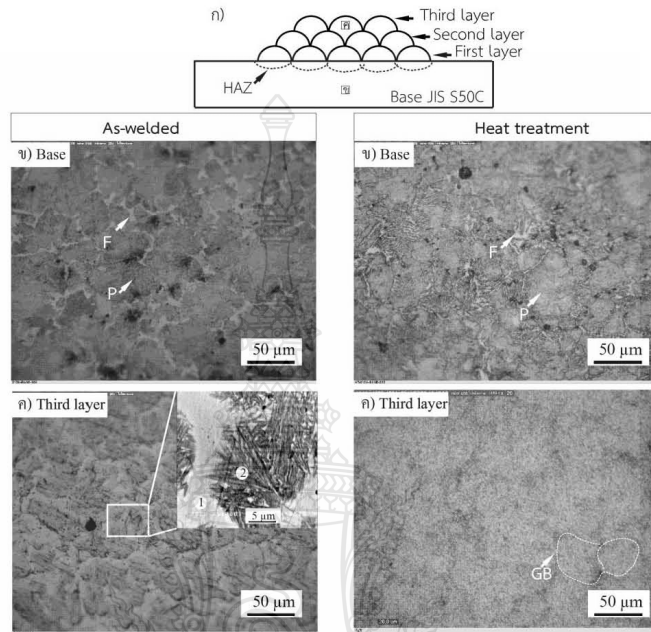
ชิ้นงานการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4 ถูกนำมาทำการการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนด้วยความร้อน จำนวน 1-3 รอบดังที่อธิบายในวิธีการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมา ผลการตรวจสอบด้วยตาเปล่าพบว่าเมื่อมีการให้ความร้อนแก่โลหะชิ้นงานที่มีการเชื่อมพอกแข็ง ความร้อนที่ให้แก่โลหะชิ้นงานส่งผลโดยตรงต่อการเสียรูปและเกิดการบิดตัวของของโลหะชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) ส่วนปลายของ โลหะชิ้นงานเกิดการบิดตัวโค้งงอขึ้นดังแนวเส้นประ และเมื่อทำการวัดการบิดตัวของโลหะชิ้นงานพบว่า รอบการให้ความร้อนในการการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนที่ให้แก่โลหะชิ้นงานส่งผลโดยตรงต่อการบิดตัว โลหะชิ้นงานมีแนวโน้มในการบิดตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนรอบของการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) และแสดงค่าการบิดตัวสูงสุดประมาณ 2.8 mm ที่การปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน 2 รอบ รอบการให้ความร้อนในการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนนอกจาก

ส่งผลทำให้เกิดการบิดตัวของโลหะชิ้นงานแล้ว สามารถส่งผลทำให้เกิดการแตกร้าวที่ตำแหน่งขอบเขตระหว่างพื้นที่กระทบร้อนและ โลหะชิ้นงานดังแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 5 (ค) ความยาวและความกว้างของการแตกร้าวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรอบการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ความแข็งแนวเชื่อมพอกแข็งที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน 3 รอบ (BM=Base Metal, HAZ=Heat Affect Zone, FL=First Layers, SL=Second Layers, TL=Third Layers)

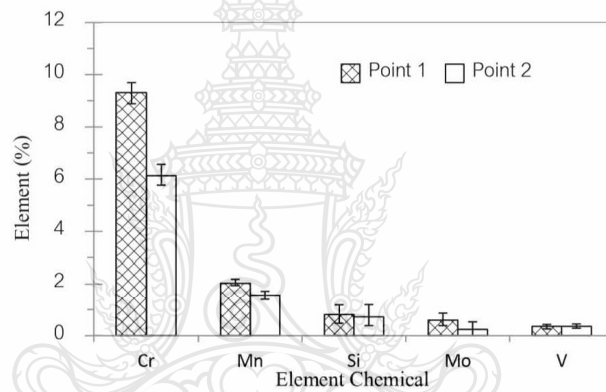
โลหะชิ้นงานที่เกิดการเสียรูปและเกิดการแตกร้าวสูงสุดคือการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน 3 รอบถูกนำมาทำการตรวจสอบความแข็งและเปรียบเทียบกับแนวเชื่อมพอกแข็งที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนดังแสดงในรูปที่ 6 ผลการทดสอบความแข็ง พบว่าบริเวณ โลหะชิ้นงาน (BM) เหล็กกล้าคาร์บอน AIS S50C ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนมีค่าความแข็งประมาณ 250 HV และบริเวณกระทบร้อน (HAZ) 450-500 HV ค่าความแข็งแนวเชื่อมพอกแข็งที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน 3 รอบ มีค่าความแข็งบริเวณ โลหะชิ้นสูงประมาณ 450-500 HV และบริเวณกระทบร้อน 500-550 HV ชั้นแนวเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1 (FL) ชั้นที่ 2 (SL) และชั้นที่ 3 (TL) ของชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนมีค่าความแข็งลดลงต่ำกว่าชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน ในขณะที่ชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนค่าความแข็งสูงขึ้นตามจำนวนชั้นพอกแข็ง และค่าความแข็งสูงสุดคือ แนวเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3 (TL) ประมาณ 703 HV แสดงดังในรูปที่ 6 สาเหตุที่ค่าความแข็งของแนวเชื่อมมีแตกต่างกัน คือ เกิดจากการเจือจางของส่วนผสมทางเคมีส่งผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น (Winarto and Priadi 2013) และการลดลงของค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Yan, Güngör et al. 2011) ใ้ข้อริบายสาเหตุว่าเป็นการสูญเสียปริมาณของคาร์บอนที่ลดลงและประกอบกับ โครงสร้างมีความละเอียดสม่ำเสมอ



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง (As-welded) ,(Heat Treatments)
กำลังขยาย 200 เท่า

รูปที่ 7 (ก) แสดงตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณ โลหะชิ้นงานพบโครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยเฟอไรต์ (สีดำ) แสดงด้วยสัญลักษณ์ P และเฟอไรต์ (สีขาว) แสดงด้วยสัญลักษณ์ F (Molleda, Mora et al. 2007, Celik and Ersozlu 2009) แสดงดังในรูปที่ ข (As-welded) เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนพบโครงสร้างเฟอไรต์และเฟอไรต์ละเอียด (Acicular ferrite) แสดงดังลูกศรชี้ในรูปที่ ข (Heat Treatments) การเกิดโครงสร้างเฟอไรต์ละเอียดคาดว่าส่งผลทำให้ค่าความแข็งสูงกว่าบริเวณโลหะชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนดังในรูปที่ 6 และสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Nunura, dos Santos et al. 2015) ที่แสดงโครงสร้างเฟอไรต์ละเอียดที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1015 และเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณตำแหน่งที่ตรวจสอบ (ค) บริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 (TL) พบว่าโครงสร้างของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนมีการกระจายตัวของเฟอไรต์และเฟอไรต์ดำสม่ำเสมอและคาดว่ามีความหนาของขอบเกรนที่ใหญ่ขึ้นส่งผลต่อค่าความแข็งลดลงแสดงดังลูกศรชี้ในรูปที่ 7 (ก) ของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yan, Güngör et al. ได้อธิบายชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมส่งผลต่อค่าความแข็งลดลง ขณะที่โครงสร้างชิ้นงานเชื่อมชั้นพอกแข็งที่ไม่ผ่านการ

ปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน (As-welded) มีการกระจายตัวของเฟสสีขาวและเฟสสีดำเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนและเมื่อนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ตำแหน่งจุดที่ 1 และ 2 แสดงดังรูปที่ 7 (ค) พบว่าที่ตำแหน่งที่ 1 เฟสสีขาวมีปริมาณของธาตุโครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) ซิลิกอน (Si) โมลิบดีนัม (Mo) และวานเดียม V สูงกว่าบริเวณตำแหน่งตรวจสอบที่ 2 เฟสสีดำแสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Srinivasan, Muthupandi et al. 2006) ที่ได้กล่าวว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุโครเมียม (Cr) และโมลิบดีนัม (Mo) ส่งผลต่อความความแข็งสูงของแนวเชื่อม



รูปที่ 8 เปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ TL (As-welded)

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนที่มีผลต่อความแข็งชั้นพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน MS S50C เชื่อมอาร์กวดใต้ฟลักซ์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- 1) การปรับปรุงสมบัติทางความร้อนส่งผลต่อชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง เช่น การแตกร้าว และการบิดแอ่นตัว และการบิดแอ่นตัวสูงสุดมีค่าประมาณ 2.8 mm เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน 3 รอบ การปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนจึงไม่แนะนำให้ประยุกต์ใช้กับแนวเชื่อมพอกแข็ง
- 2) ชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนมีค่าความแข็งสูงกว่าชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน ค่าความแข็งสูงประมาณ 703 HV ชั้นที่ 3
- 3) การเพิ่มขึ้นหรือลดลงปริมาณของโครงสร้างจุลภาคเฟสสีขาวและเฟสสีดำก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนประกอบไปด้วยธาตุโครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) ซิลิกอน (Si) โมลิบดีนัม (Mo) และวานเดียม V ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของโลหะเชื่อมพอกแข็ง

เอกสารอ้างอิง

- Arabi Jeshvaghani, R., M. Jaberzadeh, H. Zohdi and M. Shamanian (2014). "Microstructural study and wear behavior of ductile iron surface alloyed by Inconel 617." Materials & Design 54(0): 491-497.
- Buchanan, V. E., P. H. Shipway and D. G. McCartney (2007). "Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry." Wear 263(1-6): 99-110.
- Buchely, M. F., J. C. Gutierrez, L. M. León and A. Toro (2005). "The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys." Wear 259(1-6): 52-61.
- Celik, S. and I. Ersozlu (2009). "Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and AISI 1050 steels." Materials & Design 30(4): 970-976.
- Chatterjee, S. and T. K. Pal (2006). "Weld procedural effect on the performance of iron based hardfacing deposits on cast iron substrate." Journal of Materials Processing Technology 173(1): 61-69.
- Coronado, J. J., H. F. Caicedo and A. L. Gómez (2009). "The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits." Tribology International 42(5): 745-749.
- Gualco, A., H. G. Svoboda, E. S. Surian and L. A. d. Vedia (2010). "Effect of welding procedure on wear behaviour of a modified martensitic tool steel hardfacing deposit." Materials & Design 31(9): 4165-4173.
- Molleda, F., J. Mora, J. R. Molleda, E. Mora and y. B. G. Mellor (2007). "The importance of spatter formed in shielded metal arc welding." Materials Characterization 58(10): 936-940.
- Nunura, C. R. N., C. A. dos Santos and J. A. Spim (2015). "Numerical – Experimental correlation of microstructures, cooling rates and mechanical properties of AISI 1045 steel during the Jominy end-quench test." Materials & Design 76(0): 230-243.
- Srinivasan, P. B., V. Muthupandi, W. Dietzel and V. Sivan (2006). "An assessment of impact strength and corrosion behaviour of shielded metal arc welded dissimilar weldments between UNS 31803 and IS 2062 steels." Materials & Design 27(3): 182-191.
- Winarto and D. Priadi (2013). "Effect of Preheating and Buttering on Cracking Susceptibility and Wear Resistance of Hardfaced HSLA Steel Deposit." QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY 31(4): 202s-205s.

Yan, P., Ö. E. Güngör, P. Thibaux, M. Liebeherr and H. K. D. H. Bhadeshia (2011). "Tackling the toughness of steel pipes produced by high frequency induction welding and heat-treatment." *Materials Science and Engineering: A* 528(29–30): 8492-8499.

Zhang, C., X. Song, P. Lu and X. Hu (2012). "Effect of microstructure on mechanical properties in weld-repaired high strength low alloy steel." *Materials & Design* 36(0): 233-242.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวธราพร กัปโก
วัน เดือน ปีเกิด	23 พฤศจิกายน 2528
ที่อยู่	377/2 ถนน เลข-ด่านซ้าย ตำบลกุดป่อง อำเภอเมือง จังหวัดเลย 42000
การศึกษา	ปริญญาตรี สาขาวิชาอุปกรณ์ชีวการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิต
เบอร์โทรศัพท์	089-0202010
อีเมล	t.cappako@gmail.com



นางสาวธราพร กัปโก
การปรับปรุงโลหะเชื่อมอาร์กกลวดไส้ฟลักซ์พอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ด้วยความร้อน
Heat Treatment of Hard-facing Flux-cored Arc Weld Metal on JIS-S50C Carbon Steel Surface
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์

นางสาวธราพร กัปโก
การปรับปรุงโลหะเชื่อมอาร์กกลวดไส้ฟลักซ์พอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ด้วยความร้อน
Heat Treatment of Hard-facing Flux-cored Arc Weld Metal on JIS-S50C Carbon Steel Surface
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์

นางสาวธราพร กัปโก
การปรับปรุงโลหะเชื่อมอาร์กกลวดไส้ฟลักซ์พอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ด้วยความร้อน
Heat Treatment of Hard-facing Flux-cored Arc Weld Metal on JIS-S50C Carbon Steel Surface
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์

นางสาวธราพร กัปโก
การปรับปรุงโลหะเชื่อมอาร์กกลวดไส้ฟลักซ์พอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ด้วยความร้อน
Heat Treatment of Hard-facing Flux-cored Arc Weld Metal on JIS-S50C Carbon Steel Surface
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์

นางสาวธราพร กัปโก
การปรับปรุงโลหะเชื่อมอาร์กกลวดไส้ฟลักซ์พอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ด้วยความร้อน
Heat Treatment of Hard-facing Flux-cored Arc Weld Metal on JIS-S50C Carbon Steel Surface
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์

นางสาวธราพร กัปโก
การปรับปรุงโลหะเชื่อมอาร์กกลวดไส้ฟลักซ์พอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ด้วยความร้อน
Heat Treatment of Hard-facing Flux-cored Arc Weld Metal on JIS-S50C Carbon Steel Surface
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์