

อิทธิพลของอุณหภูมิระหว่างเที่ยวเชื่อมต่อสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า

JIS S50C

THE INFLUENCE OF INTER-PASS TEMPERATURE ON
HARDFACING WELD METAL PROPERTIES ON JIS-S50C STEEL
SURFACE

พรหมโชติ แก้วดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

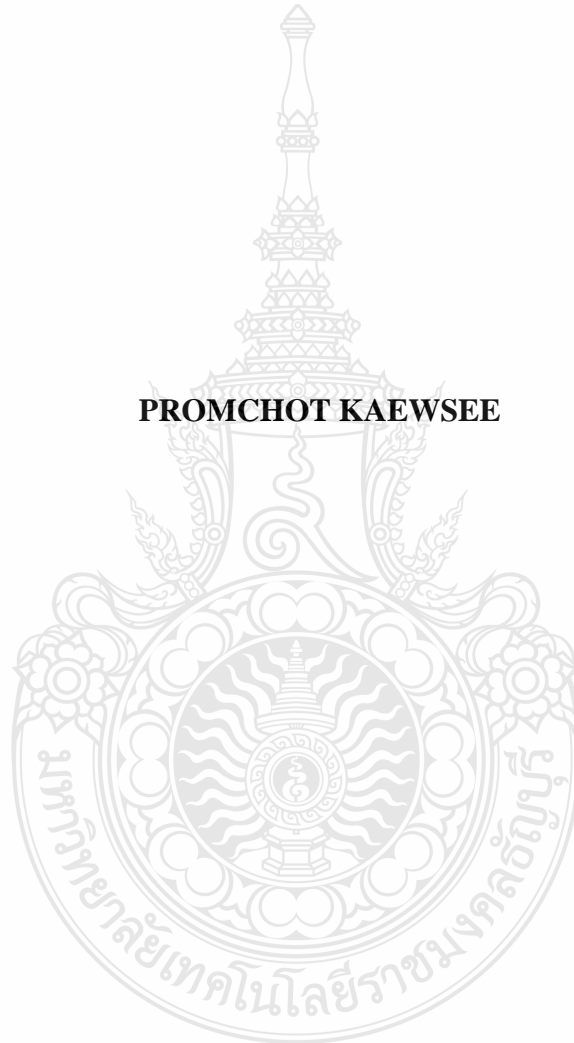
อิทธิพลของอุณหภูมิระหว่างเชื่อมเชื่อมต่อสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็ง
เหล็กกล้า JIS S50C

พรหมโชติ แก้วสี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**THE INFLUENCE OF INTER-PASS TEMPERATURE ON HARDFACING
WELD METAL PROPERTIES ON JIS-S50C STEEL SURFACE**

PROMCHOT KAEWSEE



**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 2015
COPYRIGHT OF RAJAMANGALA UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY THANYABURI**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อิทธิพลของอุณหภูมิระหว่างเที่ยวเชื่อมต่อสมบัติโลหะเชื่อมพอก
แข็งเหล็กกล้า JIS S50C

The Influence of Inter-Pass Temperature on Hardfacing Weld Metal
Properties on JIS-S50C Steel Surface

ชื่อ - นามสกุล

นายพรหม โชติ แก้วสี

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.

ปีการศึกษา

2558

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศรีรัช ต่อสกุล, D.Eng.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประยูร สุรินทร์, วศ.ค.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิวกกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 12 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมต่อสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็ง เหล็กกล้า JIS S50C
ชื่อ - นามสกุล	นายพรหมโชติ แก้วลี
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเป็นเหล็กกล้าที่มีเป็นวัตถุดิบหลักที่ได้รับความนิยมในการใช้ผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรทางการเกษตรเนื่องจากมีสมบัติทางกลดีเยี่ยมและมีราคาไม่สูง แต่เมื่อมีการใช้งานชิ้นส่วนต่างๆ จะได้รับความเสียหายจากการใช้งาน หากการเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นมีความรุนแรงต่ำชิ้นส่วนมักถูกนำมาทำการเชื่อมซ่อมเพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงได้ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ที่เชื่อมด้วยการเชื่อมอาร์กสวดหุ้มฟลักซ์

วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางตามมาตรฐาน JIS-S50C รูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าความกว้าง 100 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร และความหนา 20 มิลลิเมตร เชื่อมด้วยการเชื่อมอาร์กสวดหุ้มฟลักซ์ ตัวแปรการเชื่อมในการทดลองนี้ประกอบด้วยอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม 50-450 °C กระแสเชื่อม 90-110A การเชื่อมแบบรองพื้นและไม่รองพื้นจำนวนชั้นพอกแข็ง 3 ชั้น และทำการศึกษาค่าความลึกหรือค่าความแข็งและ โครงสร้างจุลภาคและ โครงสร้างมหภาคของโลหะ

ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้ ตัวแปรการเชื่อมที่ดีที่สุด คือ อุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม 150 °C กระแสเชื่อม 100 A การเชื่อมไม่รองพื้น และจำนวนชั้นพอกแข็ง 3 ชั้น ที่ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุด 790 HV การสึกกร่อนของโลหะมีปริมาณต่ำที่ 0.89 % พบว่าอัตราการสึกกร่อนที่ลดลงและความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเกิดขึ้นเนื่องจากปริมาณ โครเมียมในชั้นพอกแข็งเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: การเชื่อมอาร์กสวดหุ้มฟลักซ์ เหล็กกล้าคาร์บอน ผิวยพอกแข็ง การให้ความร้อนขณะเชื่อม อุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม

Thesis Title	The Influence of Inter-Pass Temperature on Hardfacing Weld Metal Properties on JIS-S50C Steel Surface
Name – Surname	Mr. Promchot Kaewsee
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Kittipong Kimapong, Ph.D.
Academic Year	2015

ABSTRACT

Medium carbon steel is the main popular raw material in the agricultural machinery manufacture due to its mechanically excellent properties. When the parts are damaged by the work, the damage is often in the low intensity. Parts are repaired to reduce production costs. For this reason, this research aimed to study the influence of inter-pass temperature on JIS-S50C carbon steel welding by flux-coated arc welding wire.

The materials used in this experiments were of JIS-S50C carbon steel plate with rectangular sized of 100 mm. width, 150 mm. length, and of 20 mm. thickness. The samples were shielded metal are welded using welding parameters. included 50-450 °C inter-pass temperature, the welding current was 90-110A ,buffer and non-buffer layer welding and 3 hard surfacing layers. This experiment was proceeded to determine the hardness, wear resistance, micro and macro-structure of the metal.

The results were as follows: the optimum welding parameter was 150 °C inter-pass temperature, current 100 A, buffer and non-buffer layer welding and 3 hard surfacing layers. The wear maximum hardness was 790 HV. The wear of metals was as low as 0.89%. The wear rate was reduced and the hardness was increased due to the increase of chromium in hard - facing weld metal

Keywords: flux-coated arc welding, carbon steel, hard surfacing layer, inter-pass temperature

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 จุดประสงค์ของงานวิจัย.....	14
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน.....	16
2.2 การเชื่อมอาร์กโลหะหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW).....	19
2.3 การทำงานของวัสดุแกนลวดเชื่อมไฟฟ้า.....	21
2.4 มาตรฐานลวดเติมสำหรับพอกผิวของประเทศเยอรมัน (DIN 8555 Part1 November1983).....	22
2.5 ความเค้นตกค้างในรอยต่อเชื่อม.....	26
2.6 การทดสอบความแข็ง.....	27
2.7 การสึกกร่อน.....	29
2.8 อุณหภูมิระหว่างเทียวเชื่อม (Interpass Temperature).....	32
2.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	33
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานทดลอง.....	41
3.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในงานวิจัย.....	42
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการวิจัย.....	54
4.1 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อผิวหน้าแนวเชื่อม.....	54
4.2 ผลการทดสอบอัตราการสึกกร่อนกับอุณหภูมิระหว่างเทียวนเชื่อม.....	54
4.3 เปรียบเทียบการทดสอบอัตราการสึกกร่อนกับกระแสเชื่อม.....	65
4.4 ผลการทดสอบอัตราการสึกกร่อนของการเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีชั้นรองพื้น..	68
4.5 เปรียบเทียบกระแสเชื่อมต่ออัตราการสึกกร่อนของการเชื่อมพอกผิวแข็งแบบ มีชั้นรองพื้น.....	71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	74
บรรณานุกรม.....	75
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก ลักษณะโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม.....	80
ภาคผนวก ข มาตรฐานลวดเชื่อม.....	83
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	85
ประวัติผู้เขียน.....	97

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าตาม AISI และ ASME.....	17
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของเหล็กกล้าคาร์บอน.....	18
ตารางที่ 2.3 น้ำยากัดชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E304.....	34
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าคาร์บอนและลวดเชื่อม (ร้อยละโดยน้ำหนัก%).....	42



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์.....	19
รูปที่ 2.2 การเชื่อมกระแสตรงขั้วตรง.....	20
รูปที่ 2.3 การเชื่อมกระแสตรงสลับขั้ว.....	20
รูปที่ 2.4 ท่าเชื่อมสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์.....	21
รูปที่ 2.5 การกระจายตัวความเค้นตกค้างตามทิศทาง x ของโลหะเชื่อม: (A) ตำแหน่งการวัดการบิดเกจ โรเซท และ (B) ผลการวัดค่าความเค้น.....	26
รูปที่ 2.6 รอยกดของการทดสอบ.....	28
รูปที่ 2.7 รอยบู่และแรงกดทดสอบ.....	28
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและแรงกดทดสอบ.....	28
รูปที่ 2.9 การสึกกร่อนแบบยึดติด (Adhesive wear).....	30
รูปที่ 2.10 การสึกกร่อนแบบขัดถู (Abrasive Wear).....	30
รูปที่ 2.11 การสึกกร่อนแบบการล้า (Fatigue wear).....	31
รูปที่ 2.12 การสึกหรอแบบสึกกร่อน (Corrosive of oxidation wears).....	31
รูปที่ 2.13 ผลของอุณหภูมิระหว่างเชื่อมต่อบริเวณรอยต่อของเหล็กกล้าความแข็งแรง 490 MPa ลวดเชื่อม GMAW โดยลวดเชื่อม JIS YGW11 5 ชนิด (อัตราการใช้ความร้อนเข้า 40 kJ/cm).....	32
รูปที่ 2.14 ทิศทางการขัดกระดาษทราย.....	34
รูปที่ 2.15 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	35
รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	36
รูปที่ 3.1 แผนการไหลขั้นตอนการดำเนินโครงการวิจัย).....	41
รูปที่ 3.2 ขนาดชิ้นงานทดลอง (หน่วย: mm).....	42
รูปที่ 3.3 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง.....	43
รูปที่ 3.4 กระจกอบลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง.....	44
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเชื่อมชั้นพอกผิวแข็งที่อุณหภูมิระหว่างเชื่อมต่างกัน.....	45
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเชื่อมชั้นพอกผิวแข็ง ก)แบบไม่มีชั้นรองพื้น ข) แบบมีชั้นรองพื้น.....	45
รูปที่ 3.7 การเจียรในผิวหน้าเพื่อกำจัดผิวดิบจากการรีดร้อน.....	46

สารบัญญรูป (ต่อ)

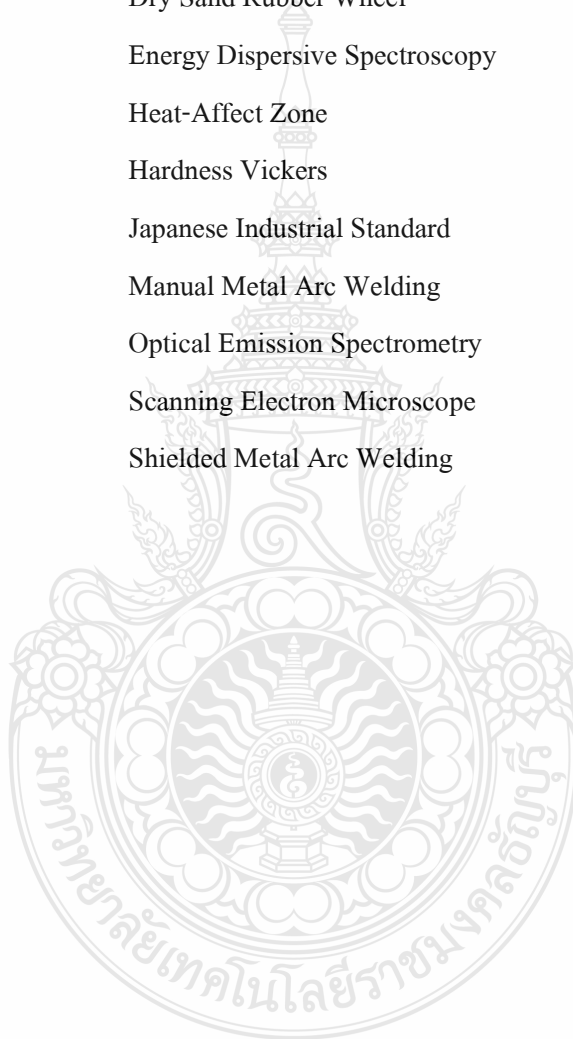
	หน้า
รูปที่ 3.8 การวัดอุณหภูมิหลังจากการอุ่นชิ้นงานด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิดิจิทัล.....	47
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเชื่อมพอกผิวแข็ง.....	47
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการออกแบบการตัดชิ้นทดสอบ.....	48
รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการตัดชิ้นงานทดสอบ.....	49
รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการขัดด้วยกระดาษทราย.....	50
รูปที่ 3.13 ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา.....	50
รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการทดสอบความแข็ง.....	51
รูปที่ 3.15 การทดสอบการสึกกร่อน (Dry Sand Rubber Wheel: DSRW) ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM G65.....	52
รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไม่โครสโคปแบบส่องกราด.....	53
รูปที่ 4.1 ผิวหน้าของชิ้นงานที่เชื่อม.....	54
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกกร่อนกับอุณหภูมิระหว่างที่ขั้วเชื่อมการเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้น.....	56
รูปที่ 4.3 ผลการตรวจสอบภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope: SEM).....	56
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive Spectroscopy:EDS).....	58
รูปที่ 4.5 การตรวจสอบโครงมหภาคแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่กระแสเชื่อม 100 A อุณหภูมิระหว่างที่ขั้วเชื่อม 150 ⁰ C.....	59
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบความแข็งของอุณหภูมิระหว่างที่ขั้วเชื่อม 50-450 ⁰ C การเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้น.....	61
รูปที่ 4.7 การวัดขนาดรูปร่างของเม็ดเกรน (ก) ขนาดเม็ดเกรน (ข) บริเวณโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 อุณหภูมิระหว่างที่ขั้วเชื่อม 150 ⁰ C และ (ค) บริเวณโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 อุณหภูมิระหว่างที่ขั้วเชื่อม 450 ⁰ C.....	62
รูปที่ 4.8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพอกผิวแข็ง 3 ชั้น อุณหภูมิระหว่างที่ขั้วเชื่อม 150 ⁰ C ที่ใช้กระแสในการเชื่อม 100A.....	63

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.9 รอยกดทดสอบความแข็งโครงสร้างพอกผิวแข็ง 3 ชั้น อุณหภูมิระหว่างเทีย เชื่อม 150°C ที่ใช้กระแสในการเชื่อม 100A.....	64
รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน โลหะเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น อุณหภูมิระหว่าง เทียเชื่อม 150°C ที่ใช้กระแสในการเชื่อม 100A.....	65
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกกร่อนกับกระแสเชื่อม 90-110A กำหนด อุณหภูมิระหว่างเทียเชื่อม 150°C	66
รูปที่ 4.12 ผลการตรวจสอบภาพถ่ายผิวสึกกร่อนกระแสเชื่อม 90A อุณหภูมิระหว่างเทีย เชื่อม 150°C ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	66
รูปที่ 4.13 โครงสร้างมหภาคที่อุณหภูมิระหว่างเทียเชื่อม 150°C (ก) กระแสเชื่อม 90 A (ข) กระแสเชื่อม 110A.....	67
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมกับค่าความแข็งที่อุณหภูมิระหว่างเทียเชื่อม 150°C การเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้น.....	68
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิระหว่างเทียเชื่อมกับอัตราการสึกกร่อนการเชื่อม แบบมีชั้นรองพื้น.....	69
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทียเชื่อมกับค่าการแอ่นตัวโค้งงอ (Bending).....	69
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ค่าความแข็งระหว่างอุณหภูมิระหว่างเทียเชื่อม $50-450^{\circ}\text{C}$ กับการ เชื่อมแบบมีชั้นรองพื้นกระแสเชื่อม 100A.....	70
รูปที่ 4.18 โครงสร้างมหภาคที่อุณหภูมิระหว่างเทียเชื่อม 150°C (ก) กระแสเชื่อม 90 A (ข) กระแสเชื่อม 110A และ (ค) กระแสเชื่อม 110A.....	71
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมกับอัตราการสึกกร่อนการเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้น	72
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ค่าความแข็งระหว่างกระแสเชื่อม 90-100A กับการเชื่อมแบบมีชั้น รองพื้นที่อุณหภูมิระหว่างเทียเชื่อม 150°C	72
รูปที่ 4.21 ผลการตรวจสอบภาพถ่ายผิวสึกกร่อนและผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน กระแสเชื่อม 100A อุณหภูมิระหว่างเทียเชื่อม 150°C การเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้น	73

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AISI	American Iron and Steel Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineering
BM	Base Metal
DSRW	Dry Sand Rubber Wheel
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
HAZ	Heat-Affect Zone
HV	Hardness Vickers
JIS	Japanese Industrial Standard
MMAW	Manual Metal Arc Welding
OES	Optical Emission Spectrometry
SEM	Scanning Electron Microscope
SMAW	Shielded Metal Arc Welding



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเป็นเหล็กกล้าที่มีความนิยมในการใช้เป็นวัสดุดิบในการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรทางการเกษตร เช่น ลูกโรลเลอร์รถเกี่ยวข้าว เป็นต้น เนื่องจากมีสมบัติทางกลด้านความแข็ง ความเหนียว และความแข็งแรงดีเยี่ยม อย่างไรก็ตามเมื่อนำชิ้นส่วนถูกใช้งานและสัมผัสเสียดสีกับสิ่งแวดล้อม เช่น การสัมผัสกับหินหรือกรวดทราย การสัมผัสกับผิวชิ้นส่วนโลหะอื่นๆ ในเครื่องจักร มักส่งผลทำให้เกิดการเสียหายและพังทลายของชิ้นส่วนขึ้น หากการเสียหายของพื้นผิวชิ้นส่วนที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงต่ำ ชิ้นส่วนดังกล่าวมักถูกนำมาทำการเพิ่มปริมาณโลหะที่บริเวณการพังทลาย กรรมวิธีการเชื่อมซ่อมด้วยวิธีการเชื่อมพอกแข็งนับเป็นหนึ่งในวิธีการสำคัญที่สามารถเพิ่มเนื้อโลหะบริเวณที่เกิดการพังทลาย สามารถเพิ่มสมบัติทางกลแก่ผิวชิ้นส่วนให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงได้ [1] การพิจารณาตัวแปรการเชื่อมพอกแข็ง เช่น วิธีการเชื่อม ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม กระแสเชื่อม อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม หรืออัตราการเย็นตัว เป็นต้น เป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญที่ส่งผลถึงการทำให้เกิดแนวเชื่อมพอกแข็งที่มีสมบัติดังต้องการและปราศจากรอยแตกร้าว หรือจุดบกพร่องใดๆ [2] ด้วยเหตุนี้การศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติของโลหะเชื่อมจึงมีการศึกษาและพัฒนาเพื่อให้มีความเหมาะสมต่อลักษณะงานตลอดเวลา

ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ทำการศึกษาศึกษาการเชื่อมพอกผิวแข็งบนโลหะเหล็กที่มีรูปแบบการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมและอุณหภูมิระหว่างเชื่อมที่น่าสนใจและคาดว่าสามารถประยุกต์ใช้ในการพัฒนาสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางให้มีค่าที่เหมาะสมในการใช้งานต่างๆ และปราศจากการเกิดการแตกร้าว หรือความเปราะในโครงสร้างจุลภาค ตัวอย่างการศึกษาและพัฒนา

สมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็ง เช่น การเชื่อมพอกแข็งจำนวน 3 ชั้นด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ 3 ชนิดบนพื้นผิว เหล็กกล้า ASTM A36 ที่พบว่าโลหะเชื่อมพอกแข็งมีความต้านทานการสึกกร่อนเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ ทั้งสองใน โลหะเชื่อมเพิ่มขึ้นและมีการอุ่นขึ้นงานก่อนการเชื่อมเสมอ [3] ในการเชื่อมเหล็กหล่อเทา มีการอุ่นงานและอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมของการเชื่อมพอกแข็งให้มีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 200°C ด้วย ลวดเชื่อม 2 ชนิดที่มีส่วนผสมของเหล็กกล้าผสม Fe-Cr-C และทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคแบบไฮโป และไฮเปอยูเทคติกในโลหะพอกแข็ง ลวดเชื่อมไฮเปอยูเทคติกให้ความต้านทานการสึกกร่อนได้ดีกว่า ลวดเชื่อมไฮโปยูเทคติก ค่าความแข็งที่เหมาะสมที่สุดพบได้กับการเชื่อมในชั้นเชื่อมชั้นแรก พฤติกรรมการสึกกร่อนนั้น ไม่มีความแตกต่างกันในทุกๆ สภาวะ และไม่เกิดการแตกร้าวในชั้นงาน ใดๆก็ตามเมื่อทำการทดสอบการสึกกร่อนพบว่ากลไกการเกิดการสึกกร่อนเกิดจากหลุดออกมา เป็นชิ้นๆ ของโครงสร้างและการแตกร้าวของผิวงาน เนื่องจากความเปราะของโลหะเชื่อมพอกแข็ง [4] นอกจากนั้นในการเชื่อมพอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กหล่อสีเทาที่มีปริมาณคาร์บอนสูง เช่น เหล็กหล่อสี เทา (ASTM2500) ต้องมีการรักษาอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมมีค่าไม่ต่ำกว่า 400°C เพื่อให้อัตราการ เกิดการสึกกร่อนลดลง พบว่าอัตราการสึกกร่อนขึ้นกับสัดส่วนของคาร์ไบด์ในผิวพอกแข็งและความ แข็งไม่ได้เป็นปัจจัยหลักในการเพิ่มอัตราการสึกกร่อนของผิวพอกแข็งแต่ขึ้นกับอัตราการกระจายตัวของเฟสคาร์ไบด์ [5]

ด้วยเหตุผลในการหลีกเลี่ยงการเกิดการแตกร้าวใน โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอก แข็งโลหะที่มีปริมาณคาร์บอนสูง และเพิ่มสมบัติทางกลของโลหะเชื่อมพอกแข็ง งานวิจัยนี้จึงมี จุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็ง เหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ที่เชื่อมด้วยการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ ผลการทดลองที่ได้สามารถใช้ เป็นข้อมูลพื้นฐาน เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาการเชื่อมผิวพอกแข็งชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและการ ซ่อมบำรุงในงานอุตสาหกรรมเกษตรต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลการให้ความร้อนระหว่างเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติทางกลของชั้นพอกผิว แข็งการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าคาร์บอน S50C

1.2.2 ศึกษาและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างโลหะวิทยาและสมบัติทางกล ของชั้นพอกผิวแข็งการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าคาร์บอน S50C

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การทดลองเป็นการประยุกต์การเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) ในการเชื่อมชิ้นงาน เหล็กกล้า JIS S50C

1.3.2 ลวดเชื่อมพอกผิวแข็งตามมาตรฐาน ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ MG 710

1.3.3 ขนาดชิ้นงานมีความกว้าง 100 ความยาว 150 และความหนา 20 กระบวนการเชื่อมตามมาตรฐานชิ้นงานเชื่อม JIS Z3114

1.3.4 ศึกษาตัวแปรการเชื่อม

- 1) อุณหภูมิระหว่างเที่ยวเชื่อม 5 ระดับ คือ 50°C, 150°C, 250°C, 350°C และ 450°C
- 2) กระแสในการเชื่อม 3 ระดับ คือ 90 A, 100A และ 110 A
- 3) ชั้นพอกผิว 3 ชั้น เชื่อมแบบไม่รองพื้นและเชื่อมแบบรองพื้น

1.3.5 ศึกษาสมบัติทางกลของรอยเชื่อม ด้วยวิธีการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน ความแข็ง ไมโครวิกเกอร์ส บริเวณรอยเชื่อม

1.3.6 ศึกษาโครงสร้างมหภาคและจุลภาค บริเวณรอยเชื่อม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ทราบเกี่ยวกับการกำหนดอุณหภูมิการอุ่นงานและอุณหภูมิระหว่างเที่ยวเชื่อมในการเชื่อมพอกผิวแข็งในการเชื่อมชั้นทับแนวหลายชั้นด้วยการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าคาร์บอน S50 C

1.4.2 ทราบถึงผลกระทบของความร้อนที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกล สมบัติการต้านทานการสึกกร่อน สมบัติด้านความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C ด้วยการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน

มนัส สติรจินดา [23] ได้อธิบายเหล็กกล้าคาร์บอน หรือ Carbon Steel เป็นวัสดุช่างประเภทเดียวที่มีสมบัติทางความแข็งแรง (Strength) และความอ่อนตัว (Ductility) ที่เปลี่ยนแปลงได้กว้างมากตามปริมาณของคาร์บอนที่มีอยู่ในเหล็กกล้าคาร์บอน ทำให้เหมาะที่จะเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมของลักษณะงาน ดังตัวอย่างเช่นในเหล็กกล้าคาร์บอน ถ้ามีปริมาณของคาร์บอนต่างกันเพียงเล็กน้อยจะทำการชุบแข็งด้วยวิธีแตกต่างกันหรือทำการขึ้นรูป (Mechanical Forming) แตกต่างกันอีก อาจจะทำให้เหล็กมีความแข็งแรงแตกต่างกันได้อย่างมากมาย คืออาจจะแปรค่าความแข็งแรงได้ถึงจำนวน 10 กิโลกรัมต่อตาราง mm อัตราการยืดตัว (Elongation) ก็อาจจะแตกต่างกันได้ตั้งแต่ 50% ถึง 0.1% เหล็กกล้าคาร์บอน คือ โลหะผสมระหว่างเหล็กและคาร์บอน ปริมาณของคาร์บอนที่มีคาร์บอนเข้าไปในเหล็กกล้าคาร์บอนส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มความแข็งแรงดึงและความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอน การแบ่งแยกชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนอาจสามารถแบ่งแยกได้โดยการใช้แผนภาพสมดุล

เหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ ที่แบ่งแยกเหล็กกล้าคาร์บอนออกเป็น 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่าร้อยละ 0.77 โครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิห้องประกอบด้วยเฟอไรต์ และเพิ่มโลท์เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.77 โครงสร้างจุลภาคที่ อุณหภูมิห้องประกอบด้วยเฟอไรต์ (เฟอไรต์และซีเมนไตต์) และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าร้อยละ 0.77 แต่ไม่เกินร้อยละ 2.00 โครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิห้องประกอบด้วยเฟอไรต์ และซีเมนไตต์ การแบ่งแยกชนิดของเหล็กโดยใช้แผนภาพสมดุลเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์นั้น เป็นการแบ่งแยกโดยการยึดเอาโครงสร้างจุลภาคเป็นหลัก ซึ่งเป็นวิธีการที่ค่อนข้างลำบากสำหรับวิศวกรในการนำไปใช้งานจริง ด้วยเหตุนี้สมาคมเหล็ก และเหล็กกล้าแห่งอเมริกา (American Iron and Steel Institute: AISI) และสมาคมวิศวกรเครื่องกลแห่งอเมริกา (American Society of Mechanical Engineering: ASME) จึงได้คิดค้นระบบในการแบ่งกลุ่มเหล็กกล้าในการนำไปใช้งานโดยการกำหนดตัวเลขขึ้นมาใช้ในการเรียก 4 ตัว ให้ตัวเลขสองตัวแรกหมายถึงธาตุผสมหลักในเหล็กกล้านั้น ขณะที่ตัวเลขสองตัวสุดท้ายหมายถึงปริมาณคาร์บอนในเหล็ก เช่น ตัวอย่าง เหล็กกล้า AISI 1040 คือ เหล็กกล้าคาร์บอน

(ตัวเลข 10) ที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 0.4% (ตัวเลข 40) เหล็กกล้า SAE 10120 คือ เหล็กกล้าคาร์บอน (ตัวเลข 10) ที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 1.2% (ตัวเลข 120) เป็นต้น ตัวอย่างของเหล็กกล้าชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าตาม AISI และ ASME [26]

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			

เหล็ก S50C จัดเป็นกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางที่นิยมใช้งานพื้นฐาน ทั้งงานโครงสร้าง งานอุปกรณ์การเกษตร งานเครื่องจักรกล งานแม่พิมพ์และส่วนประกอบแม่พิมพ์ รวมทั้งชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ เป็นต้น เนื่องจากเป็นเหล็กที่มีสมบัติที่ดีในหลายด้าน ทั้งด้านความแข็งแรง ความเหนียว แกร่ง และมีราคาถูก นอกจากนี้ยังสามารถทำการอบชุบเพื่อเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงได้ โดยสามารถชุบแข็งให้มีความแข็งอย่างน้อย 58 HRC ก่อนอบคืนตัว (As Quenched Hardness) และยังสามารถชุบอินดักซ์นได้คืออีกด้วย

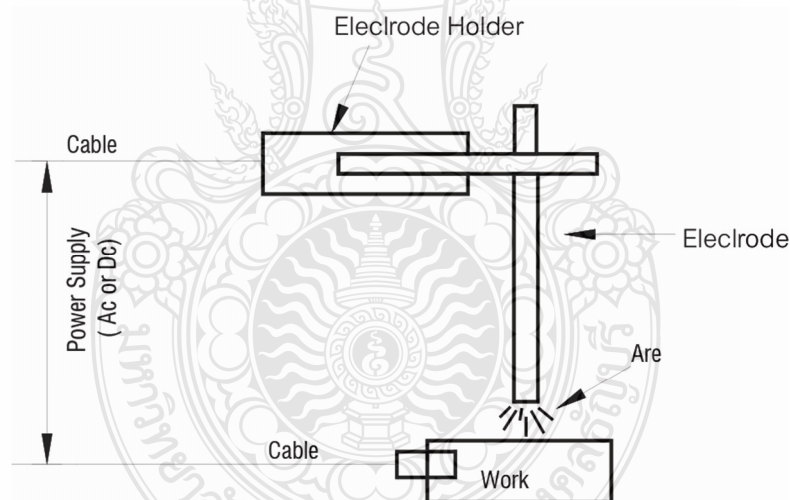
เหล็กกลุ่มนี้เป็นเหล็กพื้นฐานที่ใช้กันอยู่ทั่วไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (JIS) เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel For Machine Structural Use) จะอยู่ในมาตรฐานหมายเลข JIS G4051 โดย Code ที่ใช้จะเป็นดังในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของเหล็กกล้าคาร์บอน [22]

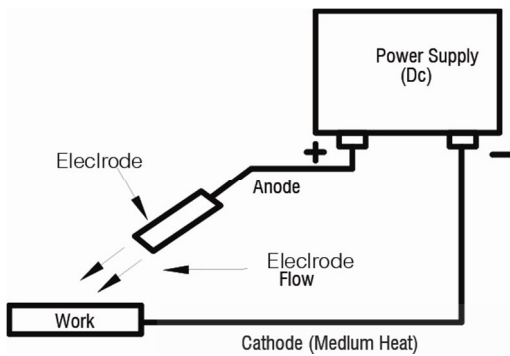
Designation of grade	C	Si	Mn	P	S
S10C	0.08 to 0.13	0.15 to 0.35	0.30 to 0.60	0.030 max.	0.030 max.
S12C	0.10 to 0.15	0.15 to 0.35	0.30 to 0.60	0.030 max.	0.030 max.
S15C	0.13 to 0.18	0.15 to 0.35	0.30 to 0.60	0.030 max.	0.030 max.
S17C	0.15 to 0.20	0.15 to 0.35	0.30 to 0.60	0.030 max.	0.030 max.
S20C	0.18 to 0.23	0.15 to 0.35	0.30 to 0.60	0.030 max.	0.030 max.
S22C	0.20 to 0.25	0.15 to 0.35	0.30 to 0.60	0.030 max.	0.030 max.
S25C	0.22 to 0.28	0.15 to 0.35	0.30 to 0.60	0.030 max.	0.030 max.
S28C	0.25 to 0.31	0.15 to 0.35	0.60 to 0.90	0.030 max.	0.030 max.
S30C	0.27 to 0.33	0.15 to 0.35	0.60 to 0.90	0.030 max.	0.030 max.
S33C	0.30 to 0.36	0.15 to 0.35	0.60 to 0.90	0.030 max.	0.030 max.
S35C	0.32 to 0.38	0.15 to 0.35	0.60 to 0.90	0.030 max.	0.030 max.
S38C	0.35 to 0.41	0.15 to 0.35	0.60 to 0.90	0.030 max.	0.030 max.
S40C	0.37 to 0.43	0.15 to 0.35	0.60 to 0.90	0.030 max.	0.030 max.
S43C	0.40 to 0.46	0.15 to 0.35	0.60 to 0.90	0.030 max.	0.030 max.
S45C	0.42 to 0.48	0.15 to 0.35	0.60 to 0.90	0.030 max.	0.030 max.
S48C	0.45 to 0.51	0.15 to 0.35	0.60 to 0.90	0.030 max.	0.030 max.
S50C	0.47 to 0.53	0.15 to 0.35	0.60 to 0.90	0.030 max.	0.030 max.
S53C	0.50 to 0.56	0.15 to 0.35	0.60 to 0.90	0.030 max.	0.030 max.
S55C	0.52 to 0.58	0.15 to 0.35	0.60 to 0.90	0.030 max.	0.030 max.
S58C	0.55 to 0.61	0.15 to 0.35	0.60 to 0.90	0.030 max.	0.030 max.
S09C K	0.07 to 0.12	0.10 to 0.35	0.30 to 0.60	0.025 max	0.025 max
S15C K	0.13 to 0.18	0.15 to 0.35	0.30 to 0.60	0.025 max	0.025 max
S20C K	0.18 to 0.23	0.15 to 0.35	0.30 to 0.60	0.025 max	0.025 max

2.2 การเชื่อมอาร์กโลหะหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW)

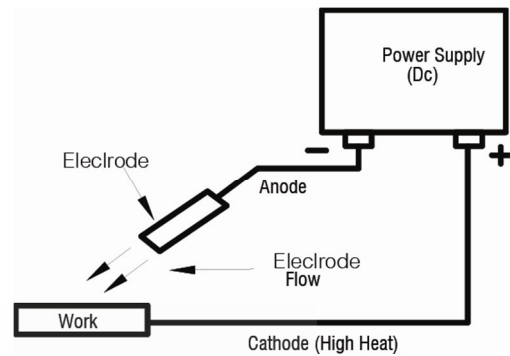
ราชบัณฑิตยสถาน [14] นิยามความหมายของคำว่า การเชื่อมอาร์กโลหะหุ้มฟลักซ์ คือ “การเชื่อมด้วยไฟฟ้าในลักษณะที่ทำให้เกิดอาร์กและได้รับความร้อนจากการอาร์กระหว่างลวดเชื่อมชนิดมีสารพอกหุ้มกับชิ้นงาน สารพอกหุ้มบนลวดเชื่อมเมื่อละลายจะทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกัน บรรยากาศลวดเชื่อมทำหน้าที่เป็นโลหะเติมด้วย สำหรับการเชื่อมนี้ไม่ต้องใช้แรงกด Singh and Dwivedi ได้เผยแพร่รูปที่ 2.1 ที่แสดงวงจรการเชื่อมอาร์กโลหะหุ้มฟลักซ์ที่กระแสถูกส่งผ่านจากแหล่งจ่ายกำลังงาน (Power Supply) ผ่านสายไฟ (Cable) เข้าสู่ชิ้นงาน (Work) ผ่านอุปกรณ์การจับยึด (Clamp) และลวดเชื่อม (Electrode) ผ่านมือจับลวดเชื่อม (Electrode Holder) เมื่อปลายลวดเชื่อมถูกวางไว้บนผิวของชิ้นงานที่ระยะที่เหมาะสมส่งผลทำให้กระแสสูงไหลผ่านช่องว่างเข้าสู่ชิ้นงานตลอดวงจรการเชื่อมทำให้เกิดการอาร์ก (Arc) ที่บริเวณที่ต้องการเชื่อมอุณหภูมิของการอาร์กที่มีค่าประมาณ 3000-4000 °C ทำให้เกิดความร้อนที่ทำให้โลหะเกิดการหลอมละลายเกิดเป็นบ่อหลอมละลาย และเมื่อโลหะหลอมละลายเกิดการหลอมละลายจะทำให้เกิดโลหะเชื่อมขึ้น



รูปที่ 2.1 การเชื่อมอาร์กโลหะหุ้มฟลักซ์

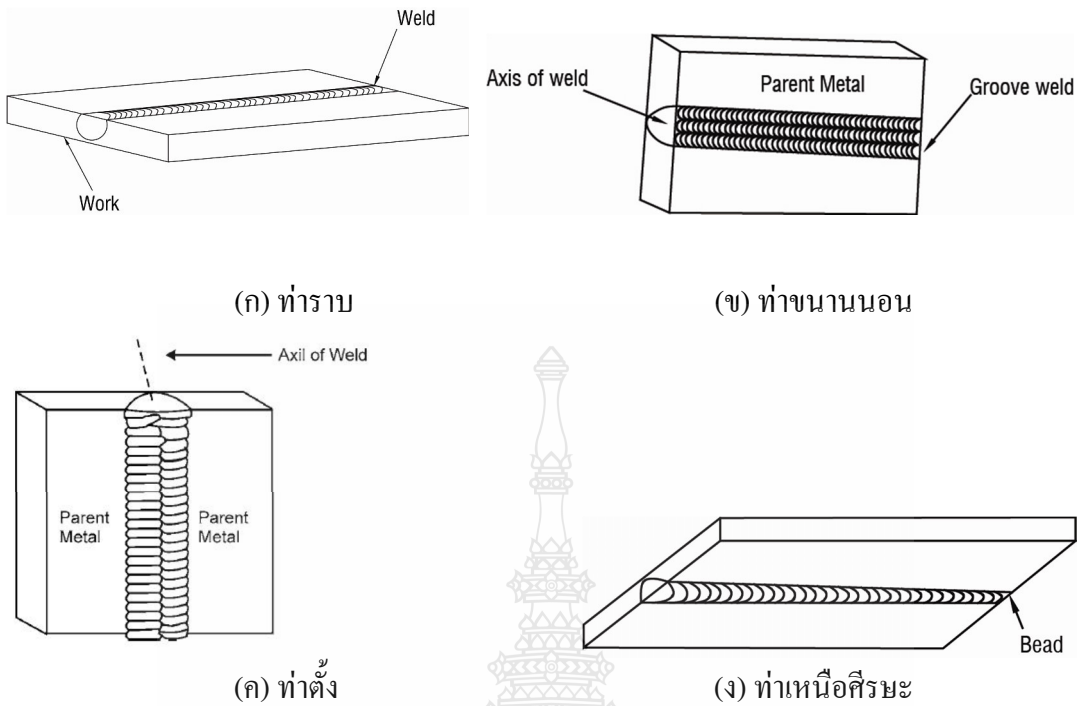


รูปที่ 2.2 การเชื่อมกระแสตรงขั้วตรง



รูปที่ 2.3 การเชื่อมกระแสตรงสลับขั้ว

ในการเชื่อมอาร์กหลอดหุ้มฟลักซ์สามารถใช้กระแสในการเชื่อมทั้งสองแบบ คือ กระแสสลับ (Alternative Current: AC) และกระแสตรง (Direct Current: DC) ในการเชื่อมกระแสตรง เครื่องกำเนิดกระแสตรงสามารถผลิตกระแสตรงที่มีกระแสสูงถึง 600 แอมแปร์ แรงดันไฟเชื่อมของวงจรเปิดมีค่าประมาณ 45-95 โวลต์ และวงจรปิดมีค่าประมาณ 17-25 โวลต์ เครื่องเชื่อมกระแสตรงแบ่งออกได้เป็นสองประเภทดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3 คือ การเชื่อมกระแสตรงขั้วตรงที่ลวดเชื่อมกำหนดให้เป็นขั้วบวก (Anode) และชิ้นงานถูกกำหนดให้เป็นขั้วลบ (Cathode) อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วลบไปขั้วบวกความร้อนส่วนใหญ่เกิดที่ชิ้นงาน และการเชื่อมกระแสตรงสลับขั้วที่ลวดเชื่อมกำหนดให้เป็นขั้วลบ (Cathode) และชิ้นงานถูกกำหนดให้เป็นขั้วบวก (Anode) อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วลบไปขั้วบวกความร้อนส่วนใหญ่เกิดที่ลวดเชื่อม ขณะที่การเชื่อมด้วยไฟฟ้ากระแสสลับมีข้อดีที่มีต้นทุนในการเชื่อมต่ำอุปกรณ์ในการเชื่อมไม่ สลับซับซ้อนเหมือนการเชื่อมด้วยกระแสตรง กระแสไฟเชื่อมสามารถเปลี่ยนแปลงได้สูงจาก 150-1000 แอมแปร์ ความยาวการอาร์ก (Arc Length) คือ ระยะจากปลายลวดเชื่อมถึงด้านล่างของการอาร์ก ควรมีการ เปลี่ยนแปลงความยาวประมาณ 3-4 mm การเชื่อมที่มีระยะการอาร์กสั้นเกินไป เวลาที่ทำให้เกิดการ สัมผัส (Time of Contact) จะสั้นกว่า และทำให้แนวเชื่อมมีความกว้างและตื้น และการซึมลึกน้อยเมื่อ เปรียบเทียบกับช่วงระยะการอาร์ก ยาว



รูปที่ 2.4 ทำเชื่อมสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

รูปที่ 2.4 แสดงที่เชื่อมพื้นฐานของการเชื่อมพื้นฐานประกอบไปด้วยทำราบ (Flat Position) รอยต่อ ลูกวางบนพื้นระนาบ ตำแหน่งการเชื่อมอยู่ด้านบนแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) ทำขนาน (Horizontal Position) รอยต่อลูกวางตะแคงข้าง ตำแหน่งการเชื่อมขนานกับแนวระนาบดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) ทำตั้ง (Vertical Position) รอยต่อลูกวางตั้งขึ้นด้านบน ตำแหน่งการเชื่อมตั้งฉากกับแนวระนาบดัง แสดงในรูปที่ 2.4 (ค) และทำเหนือศีรษะ (Vertical Position) รอยต่อลูกวางอยู่เหนือศีรษะผู้ปฏิบัติการ เชื่อม ตำแหน่งการเชื่อมขนานกับแนวระนาบและอยู่ด้านล่างของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ง)

2.3 การทำงานของวัสดุแกนลวดเชื่อมไฟฟ้า [24]

แกนลวดเชื่อมไฟฟ้านอกจากจะเป็นตัวหลอมละลายเติมเนื้อ โลหะแก่บ่อหลอมแก้ว ยังทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าจากลวดเชื่อมไปยังชิ้นงานและเป็นตัวเขี่ยให้เกิดประกายอาร์ค ลวดเชื่อมต้องมีสมบัติที่สำคัญคือเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าที่ทำให้จุดประกายอาร์คได้ง่าย สะดวก และหลอมละลายได้ดี วัสดุแกนลวดเชื่อมหลอมละลายกับวัสดุชิ้นงานในบ่อหลอม อัตราส่วนผสมของวัสดุแนวเชื่อมจะมีเนื้อวัสดุชิ้นงาน 1 ส่วน วัสดุลวดเชื่อม 2 ส่วน สมบัติของวัสดุแนวเชื่อมต้องมีสมบัติเหมือนวัสดุแกน

ลวดเชื่อมและวัสดุชิ้นงานมากที่สุดนั่นก็คือ ธาตุที่เป็นโลหะและโลหะที่ผสมอยู่ในลวดเชื่อมรวมทั้งวัสดุชิ้นงานจะต้องไม่ถูกเผาไหม้ในบ่อหลอมจนทำให้เสื่อมคุณภาพ สูญเสียสมบัติ ในกรณีที่จะมีการสูญเสียเกิดขึ้นบ้างก็จะเป็นเพียงส่วนน้อยสารพอกหุ้มที่แกนลวดจะทำหน้าที่เพิ่มธาตุหรือสารประกอบขดเซซ การถูกเผาไหม้ ขณะเชื่อมทำให้สมบัติของแนวเชื่อมและวัสดุชิ้นงานมีสมบัติเหมือนวัสดุก่อนการเชื่อมมากที่สุด

วัสดุช่วยงาน คือ วัสดุที่ใช้เติมลงไป ในบ่อหลอมละลายขณะทำการเชื่อมพร้อมกับลวดเชื่อม เพื่อให้สมบัติของโลหะภายหลังจากการเชื่อมดีขึ้น และรักษาสมบัติของโลหะเดิมไว้ วัสดุช่วยงานอาจมีสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สก็ได้ วัสดุช่วยงานบางชนิดทำให้สามารถเชื่อมได้สะดวกรวดเร็วได้แนวเชื่อมมีคุณภาพดี สวยงาม และแข็งแรงยิ่งขึ้น เช่น ผงเคมีเชื่อม (Flux) ใช้เป็นสารพอกหุ้มหรือขี้ผึ้งหรือซื้อประสาน (Flux) และแก๊สเฉื่อยคุณภาพสูงใช้เป็นแก๊สป้องกันแนวเชื่อมไม่ให้ทำปฏิกิริยากับอากาศ วัสดุช่วยงานใช้ป้อนให้แก่บ่อหลอมละลายพร้อมกับวัสดุลวดเชื่อมในสภาพของสารพอกหุ้มลวดเชื่อมหรือสภาพของผงเคมีหรือแก๊สพุ่งเข้าไปคลุมแนวเชื่อมขณะทำการเชื่อม

2.4 มาตรฐานลวดเติมสำหรับพอกผิวของประเทศเยอรมัน (DIN 8555 Part1

November1983) [25]

มาตรฐานลวดเชื่อมเติมประกอบด้วยลวดม้วนเติม (Filler Wire) ลวดแท่งเติม (Filler Rod) ลวดม้วนไฟฟ้า (Wire Electrodes) และลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์ (Cover Electrode) ซึ่งลวดเติมทำด้วยเหล็กกล้าไม่ผสม , เหล็กกล้าผสม , โลหะผสมแข็ง , โลหะแข็งและโลหะผสมนอกกลุ่มเหล็กที่ใช้สำหรับพอกผิวโลหะเหล็ก แบ่งประเภทส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และไส้ฟลักซ์จะแบ่งประเภทตามสมบัติเคมีของเนื้อเชื่อม

2.4.1 การแบ่งประเภทลวดเติม

Rod และ Wire แบ่งประเภทส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และไส้ฟลักซ์จะแบ่งประเภทตามสมบัติเคมีของเนื้อเชื่อม

1) โลหะเติมประเภทที่มีปริมาณเหล็กสูง

Alloy Group 1 โลหะเติมกลุ่มนี้ใช้สำหรับเชื่อมพอกผิวเหล็กกล้าไม่ผสมหรือเหล็กกล้าผสมต่ำหรือบริเวณที่ไม่ต้องการความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมเป็นพิเศษ ในกรณีนี้เนื้อเชื่อมจะไม่สามารถต้านทานการสึกกร่อนและเนื้อเชื่อมยังสามารถบดแต่งด้วยเครื่องจักรได้อีกด้วย การนำไปใช้งาน :การเชื่อมเติมเนื้อและการเชื่อมรองพื้น

Alloy Group 2 โลหะเติมกลุ่มนี้มีความต้านทานการสึกกร่อนดีกว่าโลหะผสมกลุ่ม 1 เพราะว่ามีโครงสร้างพื้นฐานแข็งแกร่งกว่าและประกอบด้วยคาร์ไบด์ในเนื้อเชื่อมโดยปกติแล้วไม่สามารถตกแต่งเนื้อเชื่อมด้วยเครื่องจักรได้ การนำไปใช้งาน : ใช้เชื่อมพอกล้อวิ่ง

Alloy Group 3 โลหะเติมกลุ่มนี้โดยทั่วไปต้องการเนื้อเชื่อมที่มีความแข็งสูงที่อุณหภูมิสูง โดยปกติเนื้อเชื่อมจะมีธาตุ W , Cr และในบางครั้งจะผสม Mo , Ni , V และ Co อีกด้วย โดยทั่วไปเนื้อเชื่อมมีโครงสร้างมาเป็นเทนไนต์เนื้อเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนมาแล้วสามารถตกแต่งด้วยเครื่องจักรได้มีความแข็งขณะร้อน (Red Hardness) จนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส การเชื่อมต้องให้ความร้อนก่อนเชื่อมและให้เย็นตัวช้าๆ เพื่อป้องกันการแตกร้าว การนำไปใช้งาน : เครื่องมือใช้งานที่อุณหภูมิ (Hot Working)

Alloy Group 4 โลหะเติมกลุ่มนี้มีส่วนผสมของธาตุคล้ายกับเหล็กกล้าไฮสปีด (High Speed Steel) เนื้อเชื่อมมีส่วนผสมของธาตุ W , Mo ,Cr และ V และในหลายกรณีจะเติมธาตุ Co ลงไปด้วย การตกแต่งด้วยเครื่องจักรจะทำได้เฉพาะเนื้อเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนแล้วเท่านั้น ยกเว้นแต่เนื้อเชื่อม 1 หรือ 2 ครั้ง การให้ความร้อนก่อนและหลังเชื่อมจะต้องทำตามคู่มือของผู้ผลิต การนำไปใช้งาน : เครื่องมือตัด , Mandrels , ไบมีดตัด , คมดอกเจาะ เป็นต้น

Alloy Group 5 โลหะเติมกลุ่มนี้มีส่วนผสมโครเมียมสูง 5-30% และมีคาร์บอนไม่เกิน 0.2% เนื้อเชื่อมมีความแข็งเพิ่มขึ้นด้วยการมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ การเชื่อมกระทำได้นบนโลหะที่มีส่วนผสมคล้ายกันและบนเหล็กกล้าโครงสร้างที่มีความแข็งแรงต่ำอีกด้วย โลหะเติมกลุ่มนี้ไม่อาจจะตกแต่งด้วยเครื่องจักรได้เสมอไป การให้ความร้อนก่อนและหลังเชื่อมกระทำตามคู่มือจากผู้ผลิต การนำไปใช้งาน : ใช้เชื่อมพอกผิวงานต่อต้านการเกิดกิเลส (บรรยากาศแก๊สที่มีกำมะถัน) และเมื่อมีโครเมียมผสม 12 % หรือมากกว่าและยังจะป้องกันการเกิดสนิมอีกด้วย ได้แก่ งานชิ้นส่วนวาล์ว , ชิ้นส่วนของเตา

Alloy Group 6 โลหะเติมกลุ่มนี้มีเนื้อคล้ายกับกลุ่มที่ 5 แต่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่สูงมีความแข็งสูงกว่า 500 HB และมีความต้านทานต่อการเกิดสนิมต่ำ เนื้อเชื่อมจะมีความแข็งในอากาศ (Air Hardening) และการทำงานจะทำให้เฉพาะการเจียรระไนเท่านั้น การเชื่อมควรให้ความร้อนก่อนเชื่อม 200-300 องศาเซลเซียส การนำไปใช้งาน : เครื่องมือตัด , ไบตัด และลูกรีดสำหรับการรีดเย็น

Alloy Group 7 โลหะเติมกลุ่มนี้มีเนื้อเชื่อมคล้ายเหล็กกล้าเมงกานีสและยังมีธาตุอื่นๆ เนื้อเชื่อมชนิดนี้เหมาะกับการงานประเภท Work Hardening คือ จะต้องมีการกระทำจึงจะเกิดความแข็งหรือความแข็งแรงจากการใช้งานความแข็งเริ่มจาก 180 จนถึง 550 HB แต่ไม่เหมาะกับการงานที่

ต้องการความต้านทานต่อการสึกกร่อนจากการเสียดสีเนื้อเชื่อม โดยปกติจะไม่ตกแต่งด้วยเครื่องจักร ถ้ากระทำได้ใช้เครื่องมือที่เป็นโลหะแข็งชิ้นงานที่นำมาเชื่อมขณะจะต้องรักษาให้เย็นเท่าที่จะเย็นได้ เพื่อให้ได้ผลของความเหนียวหยุ่น (Toughness) เป็นที่พอใจ การนำไปใช้งาน : เชื่อมเสริมผิวในกรณีพื้นที่ใหญ่ ได้แก่ แผ่นกันสีก เป็นต้น

Alloy Group 8 โลหะเติมกลุ่มนี้ให้เนื้อเชื่อมมีความเหนียวสูงกว่ากลุ่ม 7 ทำให้แข็งโดย Work Hardening ได้ดีมีความต้านทานต่อการเกิดสนิมไม่ต้องทำการอบชุบ, ตกแต่งด้วยเครื่องจักรได้, ไม่เป็นแม่เหล็ก การนำไปใช้งาน : ส่วนประกอบของฟินบคหินที่รับภาระไม่รุนแรง, รางรถไฟ

Alloy Group 9 โลหะเติมกลุ่มนี้มีส่วนผสมเทียบเท่าลวดเชื่อม Ni-Cr ออสเทนไนต์ สามารถใช้เชื่อมกับเหล็กกล้าชนิดเดียวกัน, เหล็กโครเมียมและเหล็กกล้าโครงสร้างทั่วไปเนื้อเชื่อมมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนดีเนื้อเชื่อมสามารถทำการขึ้นรูปเย็นและมีความเหนียวสูงยังสามารถตกแต่งด้วยเครื่องจักรได้ การนำไปใช้งาน : ใช้เชื่อมพอกงานที่ทนต่อการกัดกร่อนหรือทนความร้อน

Alloy Group 10 เนื้อเชื่อมที่ได้จากลวดเชื่อมกลุ่มนี้คล้ายกับเหล็กกล้าโครเมียมที่เพิ่มคาร์บอนและเกิดหรือไม่เกิดจากการก่อตัวของคาร์ไบด์ก็ได้ ปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ 2-7 % ส่วนโครเมียมไม่เกิน 40% เนื้อเชื่อมจะมีคาร์ไบด์แทรกอยู่ในโครงสร้างออสเทนไนต์ความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอน แต่จะไม่เพิ่มด้วยช่วยลดความไวต่อการแตกร้าว เนื้อเชื่อมทนต่อการสึกหรอ การนำไปใช้งาน : ใช้สำหรับการเชื่อมงานในเหมืองแร่และโรงงานเหล็ก เชื่อมพอกชิ้นส่วนเครื่องจักรก่อสร้าง และเครื่องจักรกลเกษตร

2) โลหะเติมที่มีปริมาณเหล็กต่ำ

Alloy Group 20 โลหะเติม Co-Cr มีความต้านทานต่อการสึกกร่อน, การกัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงดี คุณสมบัติเด่นอีกประการหนึ่งคือคงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงไม่เกิน 600 องศาเซลเซียส การเชื่อมจะต้องใช้ความร้อนก่อนเชื่อม 400-600 องศาเซลเซียส และหลังจากนั้นให้เย็นตัวช้าๆ และไม่จำเป็นต้องทำการอบชุบด้วยความร้อน การนำไปใช้งาน : งานประกอบทุกชนิด, บ่าวล้อไอเสียของเครื่องยนต์สันดาปภายใน, บ่าวล้อเครื่องจักรไอน้ำ, เพล่าปัมและชิ้นส่วนที่มีการกัดกร่อนและการเซาะกร่อนรุนแรง (Erosion)

Alloy Group 21 สมบัติของเนื้อเชื่อมที่ได้จากโลหะเติมกลุ่มนี้ ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของโครเมียมคาร์ไบด์และทังสเตนคาร์ไบด์ โดยปกติจะนำผงโลหะโครเมียมคาร์ไบด์และทังสเตนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปเป็น Rod หรือ Core Wire เพื่อนำมาเชื่อม เนื้อเชื่อมมีความสามารถต้านทานการสึก

กร่อนดี ส่วนความเหนียวขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของคาร์ไบด์ที่ผสมอยู่ในวัสดุพื้นที่ทำหน้าที่ยึดเกาะ การเชื่อมจะต้องให้ความร้อนก่อนเชื่อม 400-600 องศาเซลเซียส และไม่ต้องทำการอบชุบด้วยความร้อน การนำไปใช้งาน : เครื่องมือและชิ้นส่วนเครื่องจักรที่นำไปใช้กับงานขุดหิน , ดอกเจาะ และสกรูอัด , สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก

Alloy Group 22 เนื้อเชื่อมที่ได้จากโลหะเติม Ni-Cr-B มีความต้านทานต่อการสึกกร่อนที่เกิดจากการกัดสีของโลหะและมีความแข็งที่อุณหภูมิสูง ความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้องเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม ปริมาณ C ,Cr และ B คือความแข็งตั้งแต่ 30-60 HRC เนื้อเชื่อมสามารถงานกับอุณหภูมิสูงจนถึง 500 องศาเซลเซียส การเชื่อมจะต้องให้ความร้อนก่อนเชื่อม : วาล์ว , สกรูเกลียวหอน , เพลาน้ำคอนกรีตเหลวและปั๊มชนิดอื่นๆ

Alloy Group 23 โลหะเติมชนิด Ni-Cr-Mo มีสมบัติในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ ได้ดี การเพิ่มความแข็งแรงกระทำได้โดยการอบชุบความร้อนที่ถูกต้อง การนำไปใช้งาน : เครื่องมือสำหรับงานขึ้นรูปร้อน , หน้าสัมผัสของบ่าวาล์วในอุตสาหกรรมเคมี , และใช้เครื่องเชื่อมเสริมใบมีดตัดงานที่อุณหภูมิสูง

3) โลหะเติมนอกกลุ่มเหล็ก (Non-Ferrous Filler Metals)

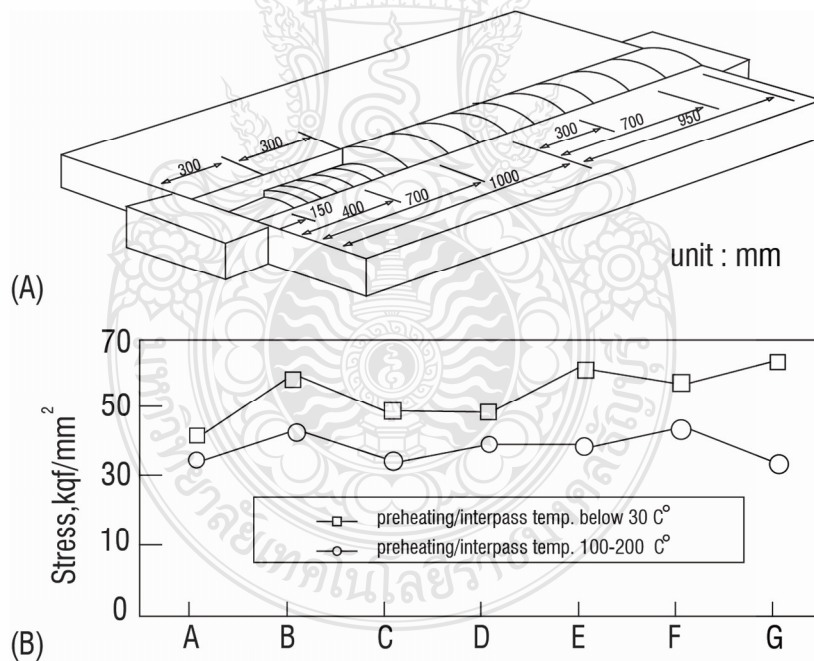
Alloy Group 30 โลหะเติมชนิดกลุ่มนี้เป็นโลหะผสมทองแดง-ดีบุก ประกอบด้วย 6-12 % Sn และฟอสฟอรัส 0.5% ความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมพอกอยู่ระหว่าง 60-130 HB และขึ้นอยู่กับปริมาณผสมของ Sn โลหะผสมกลุ่มนี้มีความต้านทานต่อ Sliding Wear สูง, มีความต้านทานต่อสารละลายเกลือและกรด การนำไปใช้งาน อาทิ : เปลือกเบร้ง , เพลา เกจวาล์ว , เสื้อหุ้ม , เฟืองหอน และเฟืองเฉียง

Alloy Group 31 โลหะเติมกลุ่มนี้มีอูมิเนียมผสมหลัก 2-15% สำหรับเนื้อโลหะผสม 2ธาตุ จะมีความแข็ง 100-200 HB และมีความต้านทานต่อสารเคมี สมบัติทางกล, ความต้านทานต่อการกัดกร่อนและสมบัติต่อการนำไปทำงาน ขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุผสมเติมลงไปได้แก่ Fe , Ni และ Mn

Alloy Group 32 โลหะเติมกลุ่มนี้เป็นโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล ที่ประกอบด้วยนิกเกิล 5-45 % , เหล็กผสมจนถึง 1.5% และแมงกานีสผสมจนถึง 3.5% ความแข็งแรงสูงขึ้นไปถึง 160 HBเนื้อเชื่อมมีความต้านทาน Stress Corrosion Creaking โดยเฉพาะต้านทานต่อน้ำทะเล การนำไปใช้: เครื่องกลั่นน้ำ, ท่อน้ำ, คอนเดนเซอร์, เครื่องเคมีและตัวระบายความร้อน

2.5 ความเค้นตกค้างในรอยต่อเชื่อม

การเชื่อมเป็นวิธีการที่ก่อให้เกิดความเค้นตกค้างในปริมาณที่สูงในพื้นที่การเชื่อม ความเค้นตกค้างเกิดขึ้นเนื่องจากการดึงตัวของเนื้อโลหะอย่างไร้ทิศทางขณะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสจากของเหลวเป็นของแข็งขณะที่โลหะเชื่อมเกิดการเย็นตัว นอกจากนี้จุดวิกฤติต่างๆ เช่น ร่องบากในรอยต่อก็เป็นตำแหน่งที่ทำให้เกิดความเค้นตกค้างได้เนื่องจากบริเวณนั้นมีความเค้นเข้มข้นสูง โดยทั่วไปการแตกร้าวที่เกิดในแนวเชื่อมจะเกิดจากไฮโดรเจนเข้าไปช่วยทำให้เกิดความเค้นที่ตำแหน่งเป็นร่องหรือจุดบัพร่องแตกร้าวออกมาได้ ในการศึกษาอิทธิพลของไฮโดรเจนที่ทำให้เกิดการแตกร้าวในโลหะเชื่อมเหล็กกล้าที่มีความหนาพบว่า ความเค้นตกค้างตามยาวของแนวเชื่อมมีค่าดังแสดงในรูปที่ 2.5 ค่าความเค้นตกค้างบนรอยต่อที่มีการใช้อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมต่ำกว่าอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมปกติของเหล็กกล้าคาร์บอน (100-120°C) 120°C มีค่าความเค้นตกค้างสูงกว่ารอยต่อที่ใช้อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมปกติ ผลการทดลองตรวจพบรอยแตกร้าวตามขวางแนวเชื่อมซึ่งเกิดจากการแพร่ของไฮโดรเจนเข้าสู่แนวเชื่อม



รูปที่ 2.5 การกระจายตัวความเค้นตกค้างตามทิศทาง x ของโลหะเชื่อม: (A) ตำแหน่งการวัดการบิดเกจโรเซท และ (B) ผลการวัดค่าความเค้น

2.6 การทดสอบความแข็ง

ความแข็งเป็นการแสดงคุณสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานต่อแรงกด การขีดสี และการกลึงของวัสดุ ในการทดสอบความแข็งไม่มีวิธีใดวิธีหนึ่งที่จะสามารถทำการทดสอบได้กับทุกวัสดุ ดังนั้นการทดสอบความแข็งจึงสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในเชิงโลหะวิทยา การวัดความ แข็งจะเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกด จากหัวกดกระทำลงบนชิ้นงานทดสอบ โดยมีวิธีที่นิยมใช้งานดังนี้

1. Brinell Hardness Test เป็นการวัดความแข็งโดยอาศัยแรงกดลงที่กระทำกับลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว โดยพื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นผิวโค้ง

2. Vickers Hardness Testเป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วย พื้นที่เช่นเดียวกับการทดสอบแบบ Brinell

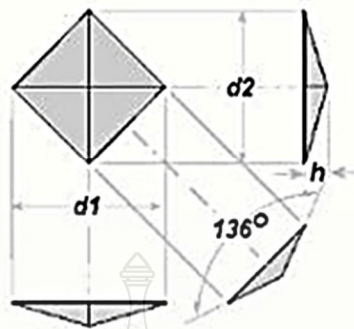
3. Rockwell Hardness Test เป็นวิธีวัดความแข็งของโลหะที่นิยมใช้มากที่สุด โดยจะวัดความแข็งจากความลึกระยะกดที่ถูกหัวกดกดด้วยแรงคงที่ มีวิธีการวัดหลายสเกล เพื่อให้สามารถเลือกใช้วัดความแข็งที่เหมาะสมมากที่สุด

สำหรับโครงการนี้มีการทดสอบความแข็งด้วยวิธี Vickers Hardness Test เพียงวิธีเดียวเท่านั้น จึงขอกล่าวถึงข้อมูลพื้นฐานของการทดสอบเพื่อให้เกิดความเข้าใจในหลักการทดสอบ ดังนี้

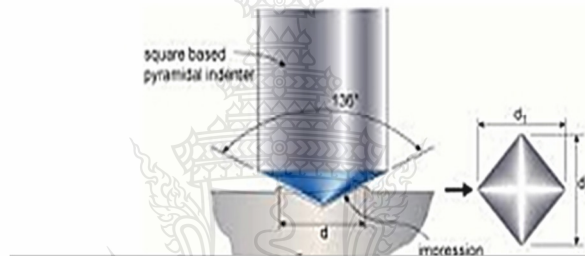
2.6.1 การทดสอบความแข็งแบบ Vickers Hardness Test [30]

ชูชาติ ค้วงสงค์ [31] 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 กระบวนการทดสอบความแข็งแบบ Vickers เป็นการทดสอบโดยการกดด้วยหัวกดที่ทำจากเพชร (Diamond Indenter) ที่มีรูปทรงเหมือนพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม ทำมุมกับด้านตรงข้าม 136 องศา กดลง ไปบริเวณผิวชิ้นงานด้วยแรงคงที่ปกติจะใช้เวลาในการกดไหลค้ำงไว้ 10-15 วินาที รูปที่ 2.6 เส้นทแยงมุม ทั้งสองของหัวกดเพชรจะทำให้เกิดรอยที่ผิวของวัสดุหลังจากที่เอาไหลค้ำงออก และใช้กล้องจุลทรรศน์วัดขนาดของรอยเพื่อ

นำไปคำนวณค่าความแข็ง ภาพแสดงรอยกดของการทดสอบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

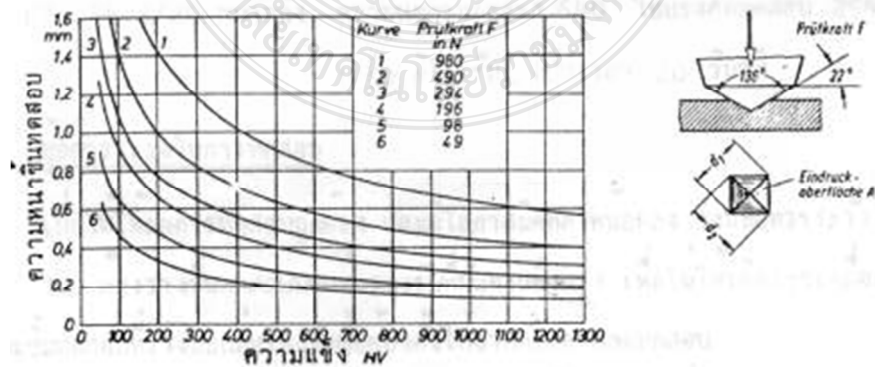


รูปที่ 2.6 รอยกดของการทดสอบ [30]



รูปที่ 2.7 ภาพแสดงรอยบุ่มและแรงกดทดสอบ [30]

หลังจากกดทดสอบแล้วไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงรูปใดๆให้เห็นทางด้านหลังของชิ้นทดสอบด้วย หรือพิจารณาความหนาของชิ้นทดสอบอย่างน้อยที่สุดที่ทดสอบความแข็งวิกเกอร์สได้ เมื่อเลือกใช้แรงกดทดสอบขนาดต่าง โดยดูจากกราฟดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและแรงกดทดสอบ [30]

2.7 การสึกกร่อน [12]

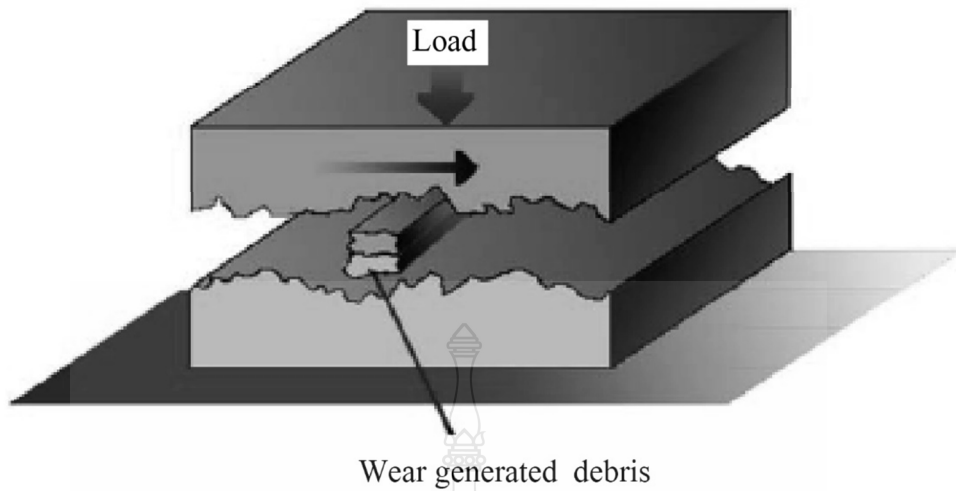
นิตินกร นรภัยพิพาษา [23] ได้อธิบายหลักการของทฤษฎีการสึกกร่อนในวิทยานิพนธ์ การสึกกร่อน (Wear) คือ ความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณผิวเนื่องจากการเคลื่อนที่ระหว่างผิวสัมผัสของมวลและสิ่งแวดล้อม โดยความเสียหายอาจอยู่ในรูปการสูญเสียมวล การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และการเกิดรอยร้าว เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวเคลื่อนที่มาสัมผัสกัน กระทั่งพื้นผิวเกิดความเสียหาย การพิจารณาการสึกกร่อนจากมวลที่สูญเสียเกิดการหลุดออกของวัสดุกลายเป็นเศษการสึกกร่อน (Wear Debris) และขนาดของรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปในระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งหากไม่ได้รับการแก้ไขอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายของชิ้นส่วนนั้นในระหว่างการใช้งาน หรืออาจทำให้สูญเสียหน้าที่การทำงานของทั้งระบบอย่างฉับพลัน

2.7.1 กลไกการสึกกร่อน

การแบ่งกลไกของการสึกกร่อนสามารถใช้เปรียบเทียบการสึกกร่อนประเภทต่างๆ ได้

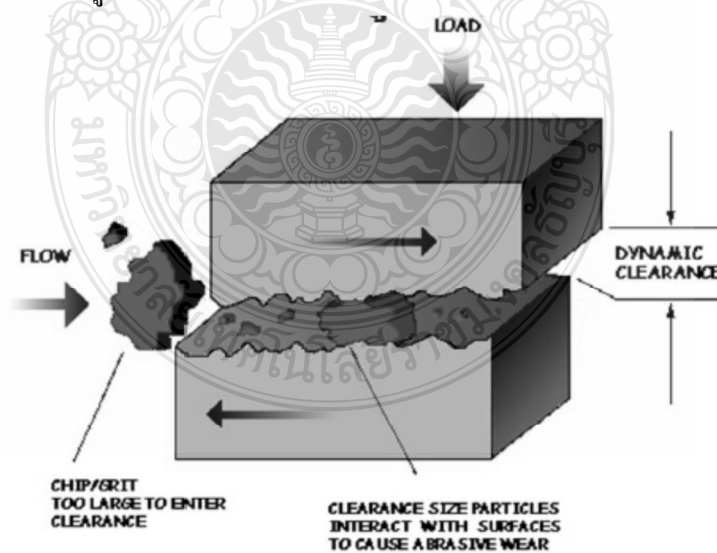
เพื่ออธิบายกลไกการสึกกร่อนและเข้าใจการเปลี่ยนรูปแบบการสึกกร่อนจากประเภทหนึ่งไปเป็นอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งความรู้นี้สามารถใช้ในการออกแบบช่วยลดการสึกกร่อนและทำนายอายุการใช้งานได้ โดยทั่วไปนิยมแบ่งการสึกกร่อนตามประเภทของกลไกการสึกกร่อน 4 ประเภท ดังนี้

- 1) การสึกกร่อนแบบยึดติด (Adhesive Wear) แสดงดังรูปที่ 2.9 เกิดขึ้นจากการที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสทำให้เกิดการดึงระหว่างผิวสัมผัสเมื่อมีการเคลื่อนที่และส่งผลให้เกิดการสูญเสียมวลหรืออาจเรียกอีกอย่างว่า การสึกกร่อนจากการไถล (Sliding Wear) เกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ไถลที่รอยต่อระหว่างหน้าสัมผัส และเกิดแรงดึงส่วนที่ติดแน่นและอ่อนแอกว่าแยกจากกันเกิดฟิล์มถ่ายโอน (Transfer Film) ไปสู่อีกพื้นผิวหนึ่ง ทำให้การสึกกร่อนรูปแบบนี้มีรูปแบบที่รุนแรงเนื่องจากความไม่เสถียรของแรงเสียดทานระหว่างคู่ผิวสัมผัสมีค่าสูง ส่งผลให้อัตราการสึกกร่อนสูง การสึกกร่อนแบบแนบติดเป็นพื้นฐานของความเสียหายในโลหะทุกชนิดที่มีการไถล



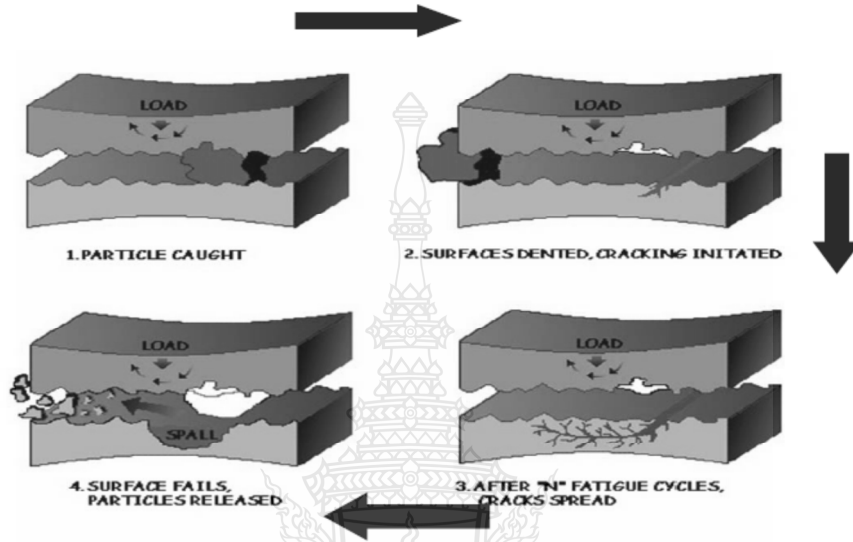
รูปที่ 2.9 การสึกกร่อนแบบยึดติด (Adhesive Wear) [24]

2) การสึกกร่อนแบบขัดถู (Abrasive Wear) แสดงดังรูปที่ 2.10 เป็นการสึกกร่อนโดยไม่มี การเชื่อมกันของผิวสัมผัส เกิดได้ 2 ลักษณะ คือ การขัดถูชนิดสองเนื้อ (Two-Body Abrasive) เกิดจากการที่ผิวแข็งไม่เรียบกดลงบนผิวอ่อน และการขัดถูชนิดสามเนื้อ (Three-Body Abrasive) เกิดจากเศษวัสดุแข็งที่อยู่ระหว่างผิวสัมผัสขูดขีดผิวสัมผัสระหว่างการเคลื่อนที่ลักษณะความเสียหายปรากฏเป็นร่อง (Groove) รอยขีดข่วน (Scratch) รอยกด (Indentation) ที่ผิว ส่งผลให้เกิดการสูญเสียมวลกลไกการสึกกร่อนแบบขัดถู



รูปที่ 2.10 การสึกกร่อนแบบขัดถู (Abrasive Wear) [24]

3) การสึกกร่อนแบบการล้า (Fatigue Wear) แสดงดังรูปที่ 2.11 เกิดจากการรับภาระซ้ำไป-มาบริเวณผิวสัมผัสส่งผลให้เกิดรอยร้าว การขยายตัวของรอยร้าว การเชื่อมต่อของรอยร้าว การหลุดล่อนของผิว จนเกิดการสูญเสียมวล การสึกกร่อนลักษณะนี้ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาภาระ และจำนวนครั้งของการเคลื่อนที่กลไกการสึกกร่อนแบบการล้าที่ผิววัสดุภายใต้สภาวะการเคลื่อนที่ไกล



รูปที่ 2.11 การสึกกร่อนแบบการล้า (Fatigue Wear) [24]

4) การสึกกร่อนแบบสึกกร่อน (Corrosive or Oxidation Wears) แสดงดังรูปที่ 2.12 เกิดจากกระบวนการทางเคมีส่งผลให้เกิดวัสดุใหม่ปกคลุมที่ผิว เช่น สนิม หรือชั้นออกซิเดชันต่าง ๆ เมื่อมีการเคลื่อนที่ชั้นออกไซด์จะแตกออกจากการเกี่ยวดึงกันของยอดสูงระหว่างผิวสัมผัสส่งผลให้เกิดการสึกกร่อน อย่างไรก็ตาม ชั้นออกไซด์จะถูกสร้างขึ้นใหม่ในเวลาต่อมา โดยกระบวนการทางเคมีเป็นตัวกำหนดอัตราการสึกกร่อน กลไกการสึกกร่อนแบบสึกกร่อน

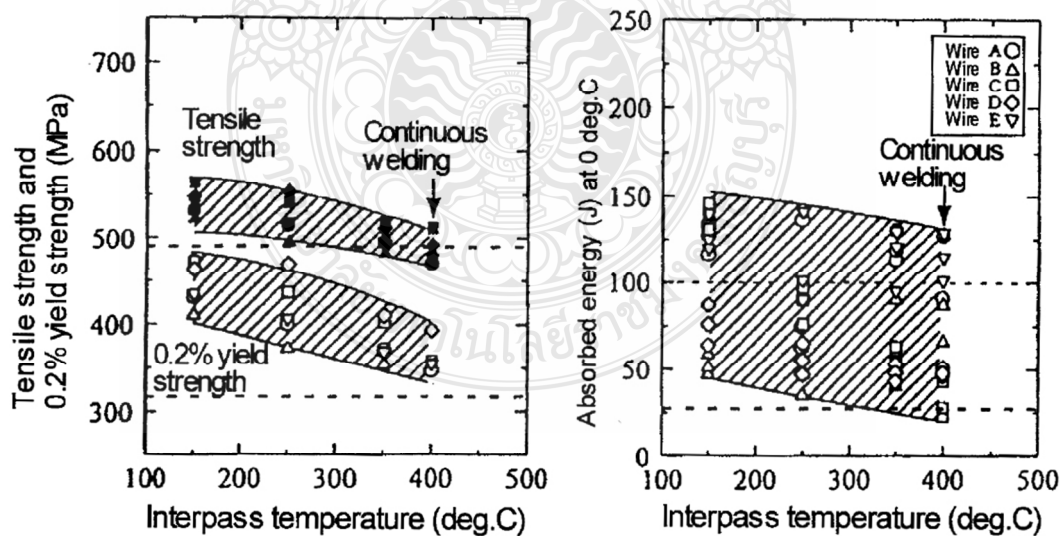


รูปที่ 2.12 การสึกกร่อนแบบสึกกร่อน (Corrosive or Oxidation Wears) [24]

2.8 อุณหภูมิระหว่างเชื่อม (Interpass Temperature)

นิยามความหมายของคำว่า อุณหภูมิระหว่างเชื่อม คือ “ในการเชื่อมแบบเชื่อมทับหลายเที่ยว อุณหภูมิของแนวเชื่อมและโลหะชิ้นงานส่วนที่อยู่ติดกันก่อนที่จะเริ่มการเชื่อมเที่ยวต่อไป” Kobelco Welding [6] ได้รายงานจุดประสงค์ของการควบคุมอุณหภูมิระหว่างเชื่อมดังนี้

- เพื่อลดความเสี่ยงในการเกิดการแตกร้าวเนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนในเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าคาร์บอน-แมงกานีส เหล็กกล้าผสมเฟอร์ริติก ที่ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิระหว่างเชื่อมต้องมีค่าต่ำสุดหรือใกล้เคียงอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม (Preheating Temperature)
- เพื่อป้องกันการเสีรูปร่างของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าคาร์บอน-แมงกานีส เหล็กกล้าผสมเฟอร์ริติก ที่ซึ่งอุณหภูมิระหว่างเชื่อมสูงสุดกำหนดไว้
- เพื่อลดความเสี่ยงในการเกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัวหรือขณะเป็นของเหลวในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค นิกเกิลและนิกเกิลผสม อลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม ที่ซึ่งอุณหภูมิระหว่างเชื่อมสูงสุดกำหนดไว้
- เพื่อรักษาการเป็ยผิวที่ดีของบ่อหลอมละลายในโลหะหลักของทองแดงและทองแดงผสม ที่ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิระหว่างเชื่อมต้องมีค่าต่ำสุดหรือใกล้เคียงอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม



รูปที่ 2.13 ผลของอุณหภูมิระหว่างเชื่อมต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าความแข็งแรง 490 MPa ลวดเชื่อม GMAW โดยลวดเชื่อม JIS YGW11 5 ชนิด (อัตราการให้ความร้อนเข้า 40 kJ/cm) [6]

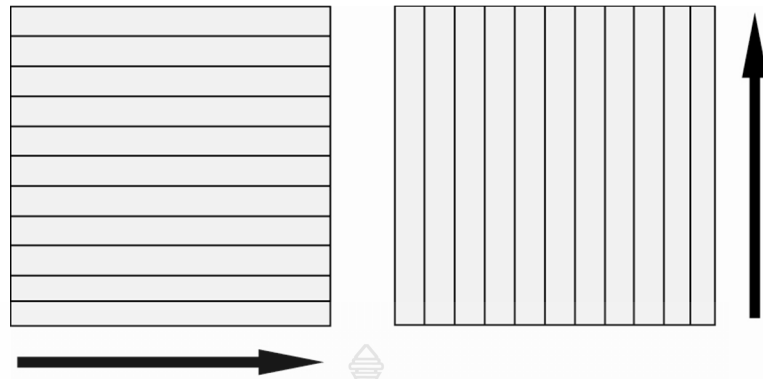
ในการใช้อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานที่สูงทำให้ต้นทุนการเชื่อมสูงเนื่องจากค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน ดังนั้นช่างเชื่อมต้องทำให้อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานมีค่าที่ต่ำสุด โดยการใช้อุณหภูมิที่ให้ความสามารถในการเชื่อมสูงสุด ขณะเดียวกันในการศึกษาเรื่อง “อุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม” คือการเชื่อมทับแนวต่อไปโดยความรวดเร็วที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เพื่อลดต้นทุนการเชื่อม ขณะเดียวกันสมบัติทางกล (ในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าเฟอร์ริติก) และความต้านทานการเกิดการแตกร้าว (ในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าออสเทนนิค) จะมียาลดลงเมื่ออุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมมีค่าสูงและอัตราการเย็นตัวต่ำ

รูปที่ 2.13 แสดงผลของอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าความแข็งแรง 490 MPa ลวดเชื่อม GMAW โดยลวดเชื่อม JIS YGW11 5 ชนิด (อัตราการให้ความร้อนเข้า 40 kJ/cm) พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ค่า 0.2% ความแข็งแรงคราก และพลังงานกระแทกของโลหะเชื่อมมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมสูง ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมต้องกำหนดแน่นอนเพื่อให้ได้สมบัติทางกล และผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมสูงสุดต้องมีค่าไม่เกิน 250°C สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงดึง 490 MPa อุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมสูงสุดต้องมีค่าไม่เกิน 150°C สำหรับเหล็กกล้าออสเทนนิค อุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมสูงสุดต้องมีค่าไม่เกิน 70°C สำหรับอลูมิเนียมเพื่อป้องกันการเกิดการแตกร้าวร้อน

2.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค [14]

2.9.1 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างมหภาคเป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่สามารถดูได้ตาเปล่าหรืออาจใช้กำลังขยายไม่เกิน 10 เท่าและการตรวจโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานนั้นนำชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบนั้นควรตัดให้เกิดพื้นที่หน้าตัด และการตัดดังกล่าวต้องหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้เพราะความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าตัดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้การตรวจสอบนั้นเกิดการผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ขนาดของชิ้นงานตรวจสอบควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 หรือ 1 นิ้ว และความสูงไม่น้อยกว่า 15 ทำการกลึงปาดหน้าผิวหน้าให้มีความสม่ำเสมอและเป็นระนาบเดียวกัน แสดงทิศทางและวิธีการขัดกระดาษ โดยทำการขัดกระดาษไปในทิศทางแนวเดียวกันจากนั้นทำการขัดขวางตั้งฉากกับรอยขัดกระดาษทรายรอยเดิม แสดงดังในรูปที่ 2.14 ขัดผิวหน้าตัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 220,320,400 และ 600 ตามลำดับในขณะที่ขัดผิวควรเปิดน้ำเพื่อไล่ผงขัดและเศษโลหะออก



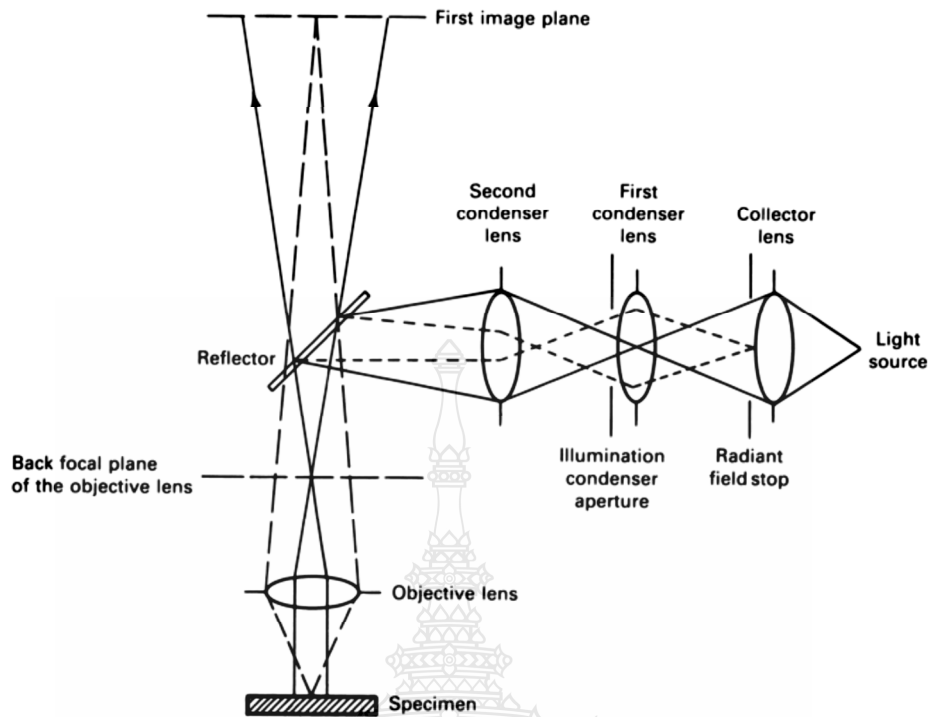
รูปที่ 2.14 ทิศทางการกัดกระดาษทราย

ขัดผิวด้วยผงขัดที่ทำมาจากผงอะลูมินา (Alumina Oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium Oxide) ที่มีขนาดตั้งแต่ 0.05-0.3 ไมครอนนำชิ้นงานตรวจสอบที่ถูกขัดผิวจนเป็นมันแล้ว ไปล้างด้วยแอลกอฮอล์ทำการกัดผิวที่ต้องการตรวจสอบด้วยน้ำยาคัดชิ้นงานดังตารางที่ 2.3 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาตรวจสอบนำชิ้นงานไปล้างด้วยแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้งทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 2.3 น้ำยาคัดชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน 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	จุ่มชิ้น ตรวจสอบนาน 10-30 วินาที

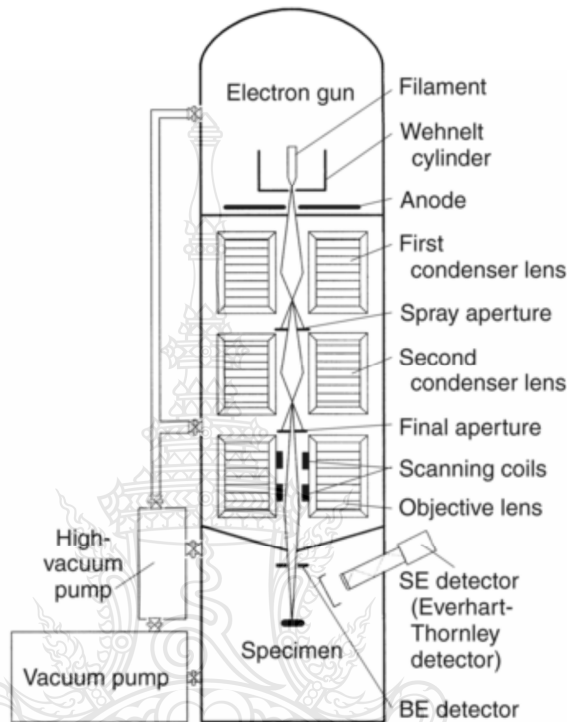
2.9.2 กล้องจุลทรรศน์สำหรับงานทางโลหะวิทยา (Metallurgical Microscope) หรือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) โดยจะมีกำลังขยายอยู่ระหว่าง 10-1,000 เท่า ที่กำลังขยายสูงช่วยทำให้การจำแนกชนิดของเฟส (Phase) โครงสร้าง (Structure) ที่ปรากฏอยู่รวมถึงลักษณะรูปร่าง และขนาดของเฟส หรือโครงสร้างนั้นๆ การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง แสดงส่วนประกอบด้วยดังในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง [30]

2.9.3 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) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอนซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะ โฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษาหลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิด

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย แสดงส่วนประกอบด้วยดังในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lee, H. W [7] ทำการศึกษาการเกิดการแตกร้าวในโลหะเชื่อมเนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนในแนวเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง EH32 TMCP โดยใช้ลวดเชื่อมที่มีตัวประสานภายใน โดยมีอุณหภูมิการอุ่นงานและอุณหภูมิระหว่างเทียวเชื่อม 100-120°C ผลการทดลองมีการรายงานว่าอุณหภูมิการอุ่นงานและอุณหภูมิระหว่างเทียวเชื่อมที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่กำหนด 100-120°C เท่ากับ 30°C แสดงค่าความแข็งแรงที่สูงกว่า และแสดงค่าความเค้นตกค้างที่สูงกว่า ขณะที่ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าที่ต่ำกว่าค่าอุณหภูมิการอุ่นงานและอุณหภูมิระหว่างเทียวเชื่อมที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่กำหนด 100-120°C

Onoro [8] ศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมของเหล็กกล้าผสมโครเมียม 9-12% โดยการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ 4 กลุ่มที่ประกอบด้วยลวดเชื่อม Fe-Cr-Mo ลวดเชื่อม Fe-Cr-

Mo-Co ลวดเชื่อม Fe-Cr-Mo-Cu ลวดเชื่อม Fe-Cr-W-Co การเชื่อมเป็นการเชื่อมซ้อนแนว 8 ชั้น ในแนวเชื่อมแต่ละแนวมีอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 200-250°C ผลการทดลองพบว่า วิธีการที่ดีที่สุดในการได้โครงสร้างมาแทนไซท์คือ การลดธาตุที่เป็นตัวก่อเฟอไรท์ให้น้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ การแทนที่ระหว่าง Mo สำหรับ W สามารถลดความเสี่ยงในการทำให้เกิดเคลด้าเฟอไรท์และทำให้เกิดการปรับปรุงสมบัติที่อุณหภูมิสูง ธาตุ Co ที่เติมลงไปในเรื่องโลหะเชื่อมทำให้เกิดเฟสออสเทนไนท์และเพิ่มความแข็งแรงครีป ความเหนียว และไม่ทำให้เกิดการลดอุณหภูมิมาแทนไซท์ อย่างไรก็ตามในรายงานผลการทดลองนี้ไม่ได้กล่าวถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม

Yang *et al.* [9] ได้ทำการศึกษาการเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์โดยลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของตัวประสานภายใน แผ่นเหล็กกล้าถูกนำมาทำการเชื่อมเดินแนวและซ้อนทับเป็นชั้น ชิ้นงานถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 คือกลุ่มในสภาพเชื่อม และกลุ่มที่ 2 ถูกนำไปทำการอบชุบตามสภาวะที่กำหนด ชิ้นทดสอบทั้ง 2 กลุ่มถูกนำไปทำการตรวจสอบหาค่าคาร์โบไนไตรด์ และตรวจสอบความต้านทานการสึกกร่อน ผลการทดลองพบว่า คาร์โบไนไตรด์ซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่างโครเมียม ไททาเนียม และนีโอเบียมในผิวพอกแข็ง มีขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวอย่างแตกต่างในชิ้นงานทั้งสองแบบ ในชิ้นงานสภาพเชื่อมเฟสคาร์โบไนไตรด์มีการตกผลึกมีขนาดประมาณ 1-3 ไมโครเมตร ขณะที่ในชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบมีขนาดผลึกที่ละเอียดกว่าในระดับนาโนและมีการกระจายที่เป็นเนื้อเดียวมากกว่า ตำแหน่งที่มีปริมาณของคาร์โบไนไตรด์สูงแสดงค่าอัตราการสึกกร่อนที่ต่ำกว่า

Zhang *et al.* [10] ทำการศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคที่มีผลต่อสมบัติทางกลในรอยเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์และรอยเชื่อมอาร์กลวดตัวประสานอยู่ภายในเหล็กกล้าผสมค่าความแข็งแรงสูง (High Strength Low Alloy: HSLA) โดยการเปรียบเทียบผลของการเชื่อมช่อมกับสภาวะที่ได้จากตลาด โดยชิ้นงานเชื่อมช่อมประกอบด้วย การเชื่อมสร้างชั้นผิวและไม่มีชั้นผิว ชิ้นงานที่ได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และความล้าตัวของรอยเชื่อม ผลการทดลองพบว่ารอยเชื่อมช่อมที่ไม่มี การเชื่อมสร้างชั้นผิวก่อนการเชื่อมจริงทำให้ความแข็งแรงบริเวณพื้นหลอมละลายมีค่าลดลง โดยมีสาเหตุมาจากเฟอไรท์ที่ถูกกักขังไว้ในโครงสร้าง ขณะที่รอยเชื่อมที่มีการเชื่อมสร้างชั้นผิวก่อนการเชื่อม นั้นแสดงการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานการล้าตัว ความหนาของชั้นผิวที่เพิ่มขึ้นทำให้ทำให้เฟอไรท์มีลักษณะเป็นแผ่นและทำให้โครงสร้างเพิลไลต์และเบนไนท์มีความละเอียดขึ้น เมื่อความหนาของชั้นผิวมีค่าเท่ากับ 10 mm ค่าความแข็งแรงและความต้านทานการล้ามีค่าลดลงเนื่องจากการเจือจางของโลหะเชื่อมเข้าสู่พื้นที่การหลอมละลาย

Buchanan *et al.* [4] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการสึกกร่อน (Wear) ของรอยเชื่อมอาร์กถวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็งที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอ้อย โดยทำการเชื่อมพอกด้วยลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของเหล็กกล้าผสม Fe-Cr-C ที่มีโครงสร้างไฮโปและไฮเปอยูเทคติก และทำการเชื่อมพอกผิวลงบนเหล็กหล่อสีเทาด้วยลวดเชื่อม 2 เกรด และทำการตรวจสอบพฤติกรรมการสึกกร่อนของผิวพอกแข็งโดยการออกแบบเป็นลักษณะล้อหมุนซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมการหีบอ้อย ผลการทดลองพบว่าลวดเชื่อมไฮเปอยูเทคติกให้ความต้านทานการสึกกร่อนได้ดีกว่าลวดเชื่อมไฮโปยูเทคติก ค่าความแข็งที่เหมาะสมที่สุดพบได้กับการเชื่อมในชั้นเชื่อมชั้นแรก พฤติกรรมการสึกกร่อนนั้นไม่มีความแตกต่างกันในทุกๆ สภาวะ กลไกการเกิดการสึกกร่อนเกิดจากหลุดออกมาเป็นชิ้นๆ และการแตกร้าวของผิวงาน

Chatterjee and Pal [11] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสึกกร่อนจากอนุภาคของแข็ง (Solid Particle Erosion: SPE) ของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งที่เชื่อมลงบนผิวเหล็กหล่อสีเทา (ASTM2500) ตามมาตรฐาน ASTM G76 พบว่าอัตราการเกิดการสึกกร่อนมีความแตกต่างตามชนิดของลวดเชื่อมพอกผิว โดยอัตราการสึกกร่อนขึ้นกับสัดส่วนของคาร์ไบด์ในผิวพอกแข็ง ความแข็งไม่ได้เป็นปัจจัยหลักในการเพิ่มอัตราการสึกกร่อนของผิวพอกแข็งแต่ขึ้นกับอัตราการกระจายตัวของเฟสคาร์ไบด์

Chatterjee and Pal [5] ทำการเชื่อมอาร์กถวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็งเหล็กหล่อสีเทา ASTM เกรด 2500 การทดลองทำการเปลี่ยนแปลงชนิดของลวดเชื่อมรองพื้น 3 ชนิด และใช้ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง 5 ชนิด ผลการทดลองพบว่า การอุ่นงาน จำนวนชั้นของการเชื่อม และอัตราส่วน Cr/C ในลวดเชื่อมพอกผิว ส่งผลต่อความยาวของการแตกร้าวที่พื้นผิวต่อพื้นที่ และความแข็งแรงการเกาะยึดของชั้นรองผิวและผิวชิ้นงาน หรือผิวชิ้นงานและชั้นพอกผิวแข็ง ความแข็งแรงการเกาะยึดที่มีความแข็งแรงสูงสุด คือ การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีนิกเกิลสูงและไม่มีชั้นรองผิว

Jeshvaghani *et al.* [12] ศึกษาอิทธิพลของการเชื่อมอาร์กถวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โดยใช้ลวดเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีส่วนผสมหลัก คือ นิกเกิล เชื่อมบนผิวเหล็กหล่อเหนียวโดยการทำการเชื่อมแนวเดียว (Single pass) และสองแนว (2 pass) ผลของการจำนวนแนวเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และโครงสร้างจุลภาคของผิวพอกแข็งถูกทำการศึกษา ผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยออสเทนดิก (Fe,C), เฟสแกมมา (Fe, Ni) และคาร์ไบด์ส่วนเล็กๆ (Cr_7C_3) ความแข็งของผิวพอกแข็งมีค่าสูงกว่าเหล็กหล่อเหนียว โดยค่าความแข็งแนวเดียวและสองแนวมีค่า 500 และ 450HV ตามลำดับ

Malek Ghaini, Ebrahimnia *et al.* [13] ศึกษาการเกิดการแตกร้าว (Crack) ภายใต้อิทธิพลของผิวพอกแข็งเหล็กหล่อเหนียวที่เกิดจากการเชื่อมอาร์กถวดหุ้มฟลักซ์และใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมหลัก คือ

นิกเกิล รอยเชื่อมที่ได้เมื่อนำไปทำการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคพบว่าความยาวของรอยแตกร้าวสัมพันธ์โดยตรงต่อความสูงของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้น หากอัตราการเย็นตัวสูงการทดลองสามารถตรวจสอบพบรอยแตกร้าวเกิดขึ้นได้ที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นได้แนวเชื่อมนี้ยากต่อการตรวจสอบและมีรูปร่างแตกต่างจากการแตกร้าวเนื่องจากการเย็นตัว นอกจากนั้นพบว่ากราฟไฟท์ก่อนกลมในเนื้อเหล็กหล่อเป็นจุดกำเนิดในการแตกร้าว

Selvi, Sankaran et al. [14] ทำการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยวิธีการเชื่อมอาร์กถวดหุ้มฟลักซ์บนวงแหวนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ A216-WCB ด้วยลวดเชื่อม E410 E430 และ Modified E340 ที่ผ่านการอบที่ 200 °C เวลา 2 ชั่วโมง การเชื่อมเป็นการเชื่อมซ้ำแนว 3 ชั้น และไม่มีการส่ายแนวเชื่อม ชิ้นงานเชื่อมที่ได้ถูกนำไปทำการทดสอบการตีกร่อน ทดสอบความแข็ง และตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคพบว่าความแข็งของแนวเชื่อมมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการตรวจสอบห่างออกจากผิวพอกแข็ง ปริมาณคาร์บอนในลวดเชื่อมที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการตีกร่อนเพิ่มขึ้น และลวดเชื่อม Modified E340 ให้การตีกร่อนน้อยที่สุด ปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้นทำให้เม็ดเกรนมีขนาดละเอียดเพิ่มขึ้น มีความเป็นเกรนคอลลมนาเพิ่มขึ้น และลดปริมาณและขนาดของเกรนหยาบลง

อรรรถกร จันทรชนะ [34] การศึกษาอิทธิพลตัวแปรเชื่อมอาร์กถวดหุ้มฟลักซ์ที่มีผลต่อสมบัติผิวพอกแข็งลูกโรลเลอร์รถเกี่ยวและนวดข้าวเหล็กกล้าJIC50C ด้วยลวดเชื่อม JIS G 4051 S50C และ JIS Z 3212:D5016 การเชื่อมเป็นการเชื่อมซ้ำแนว 3 ชั้นกระแสไฟ65-165แอมแปร์แบบสร้างชั้นรองพื้นและไม่สร้างชั้นรองพื้น วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมของเหล็กกล้าJIC50Cพบว่าความแข็งของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นตามชั้นพอกผิวที่เพิ่มขึ้นการเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นส่งผลต่อค่าความแข็งลดลง พื้นที่เฟสมีความแข็งสูงกว่าคือพื้นที่มีส่วนผสมทางเคมีของธาตุโครเมียมและ โมลิบดีนัมสูงกว่า

คณิต สิทธิพันธ์ [35] อิทธิพลการเชื่อมพอกผิวแข็งซ้ำแนวต่อสมบัติของเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นJIS-SKD11 การเชื่อมเป็นการเชื่อมซ้ำแนว 3 ชั้นกระแสไฟ80-100แอมแปร์แบบสร้างชั้นรองพื้นและไม่สร้างชั้นรองพื้น โดยให้อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมที่250องศาเซลเซียส วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมของเหล็กกล้า พบว่าจำนวนชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งส่งผลต่อความแข็งและอัตราการตีกร่อนของโลหะและกระแสเชื่อมที่แตกต่างกันส่งผลให้โครงสร้างมีรูปร่างที่ต่างกัน โลหะที่ส่งผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นและลดอัตราการตีกร่อนคือซิลิกอน โครเมียม และแมงกานีส

Winarto [36] ผลกระทบของการให้ความร้อนก่อนเชื่อม และ รองพื้น ที่มีผลต่อการพังทลาย ความต้านทานการตีกร่อน ของเหล็กมีความแข็งแรงสูงผสมต่ำ โดยใช้ลวดเชื่อม3ชั้น โดยมีอุณหภูมิการอุ่นงานและอุณหภูมิระหว่างทิวเชื่อม 100-400°C ผลการทดลองมีการรายงานว่า

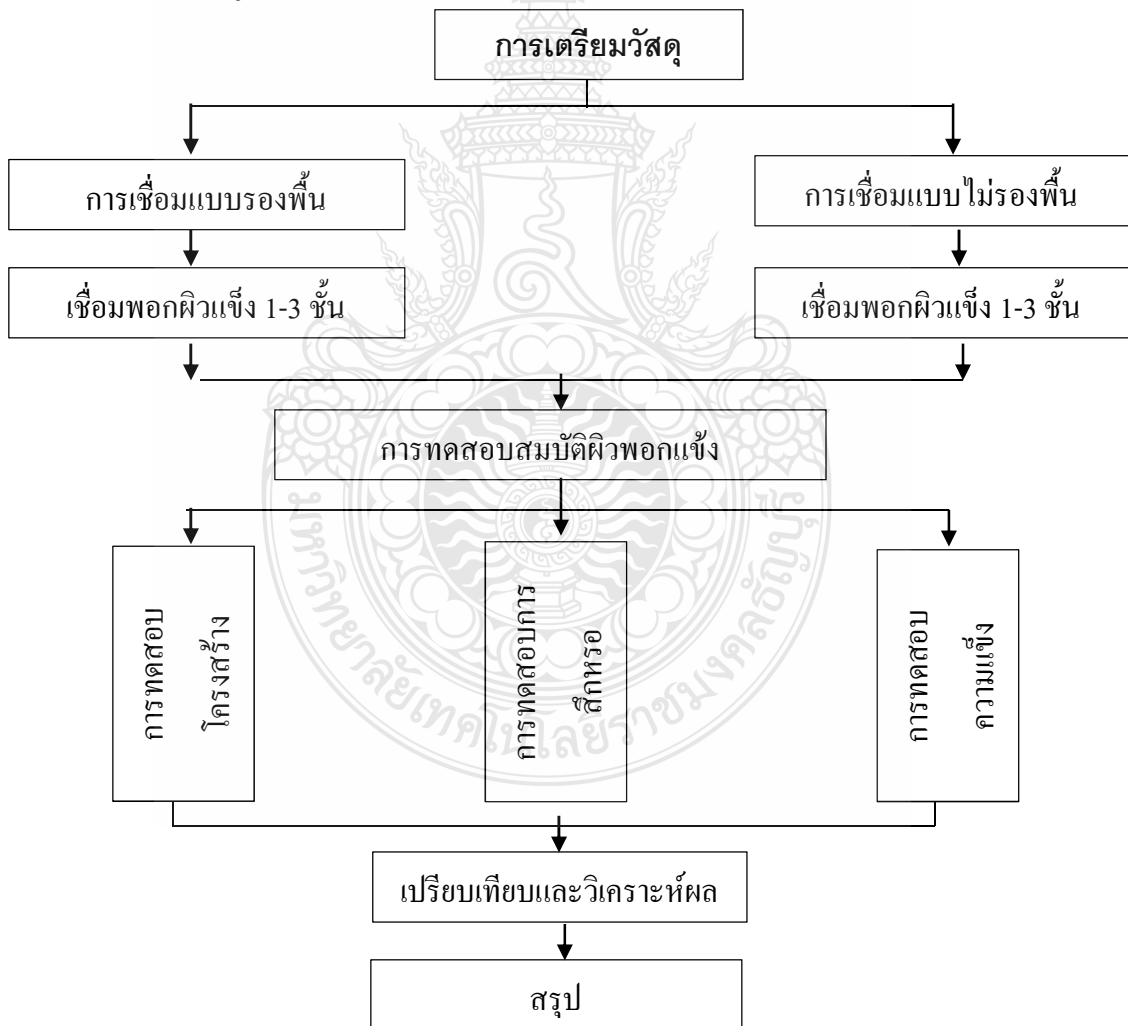
อุณหภูมิการอุ่นงานและอุณหภูมิระหว่างที่ยวเชื่อมที่อุณหภูมิต่ำ 100°C ขึ้นทดสอบแสดงค่าความแข็งที่สูงกว่า และแสดงค่าความเค้นดกค้ำที่สูงกว่า และที่ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าที่ต่ำกว่าค่าอุณหภูมิการอุ่นงานอื่นๆ



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานทดลอง

การดำเนินงานการทดลองการศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิระหว่างเที่ยวเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ที่เชื่อมด้วยการเชื่อมอาร์กถวดหุ้มฟลักซ์ โดยมีตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วย อุณหภูมิระหว่างเที่ยวเชื่อม กระแสเชื่อม และชั้นพอกผิว 3 ชั้น โดยเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้นและเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้น จากนั้นทำการทดสอบสมบัติทางกลของรอยเชื่อมด้วยวิธีการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน ความแข็งไมโครวิกเกอร์ บริเวณรอยเชื่อมและศึกษาโครงสร้างมหภาคและจุลภาค บริเวณรอยเชื่อม โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยครั้งนี้มีขั้นตอนในการดำเนินการดังรูปที่ 3.1



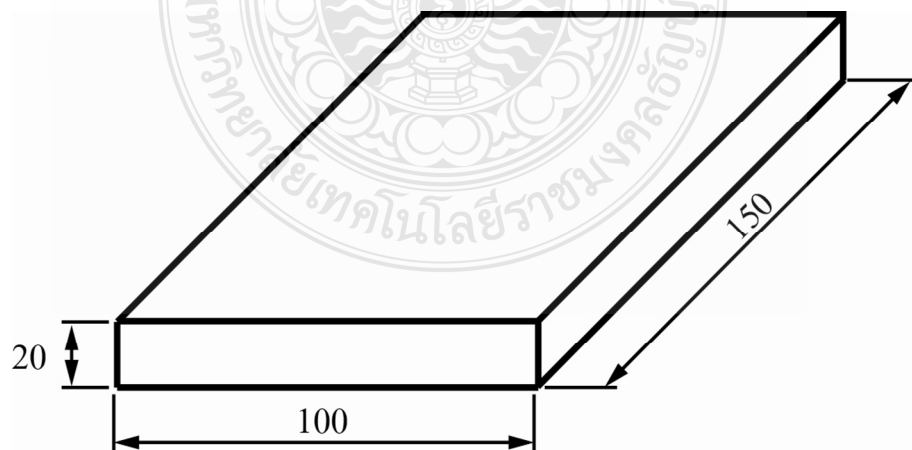
รูปที่ 3.1 แผนการไหลขั้นตอนการดำเนินโครงการวิจัย

3.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในงานวิจัย

1) วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางตามมาตรฐาน JIS-S50C ที่มีส่วนผสมทางเคมีโดยการตรวจวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะ (Optical Emission Spectrometry: OES) ดังตารางที่ 3.1 แผ่นเหล็กกล้าแผ่นรีดถูกเตรียมด้วยวิธีทางกลให้มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าความกว้าง 100 mm ความยาว 150 mm และความหนา 20 mm แสดงดังรูปที่ 3.2 ลวดหุ้มฟลักซ์ที่ใช้เชื่อม คือ ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็ง MG 710 และลวดเชื่อมรองพื้น L55 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 mm ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าคาร์บอนและลวดเชื่อม (ร้อยละโดยน้ำหนัก %)

Material		Chemical composition (%)			
Type	Standard	C	Si	Mn	Cr
Medium carbon steel	JIS S50C	0.52	0.26	0.78	0.19
Hard facing electrodes	MG 710	4.0	1.2	2	8.5
Buffer electrodes	L55	-	0.62	1.18	0.01



รูปที่ 3.2 ขนาดชิ้นงานทดลอง (หน่วย : mm)

2) เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลองนี้ ยี่ห้อ Longwell A 215 IGBT Inverter Welder เป็นเครื่องเชื่อมแบบการอาร์กโลหะด้วยมือ (Manual Metal Arc Welding: MMAW) สำหรับการใช้ช่างเชื่อมเท่านั้น โดยมีค่าของกระแสเชื่อม 0-215 A ผู้ปฏิบัติสามารถเลือกกระแสไฟฟ้าเชื่อมตามลักษณะงาน ได้คือ กระแสตรงขั้วลบ (DCEN, DC-) และ กระแสตรงขั้วบวก(DCEP, DC+) หรือ กระแสสลับ (AC) สำหรับระบบความถี่สูงนั้น ช่วยให้การเริ่มต้น ในการอาร์กง่ายขึ้นและสามารถอ่านค่ากระแสเชื่อมเป็นแบบตัวเลข การเชื่อมควบคุมพารามิเตอร์การเชื่อมด้วยคนและทำการเชื่อมด้วยมือ แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

3) การอบลวดเชื่อมเพื่อกำจัดความชื้นออกจากลวดเชื่อมในงานวิจัยนี้ใช้เป็นแบบกระบอกอบลวดเชื่อมแสดงดังรูปที่ 3.4 ที่สามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้จากเกจวัดของอุณหภูมิจาก 0-300 °C ทำการอบลวดเชื่อมที่อุณหภูมิความร้อน 200-300 °C เป็นเวลา 60 นาทีกำจัดความชื้นจากลวดเชื่อม



รูปที่ 3.4 ครอบกอบลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

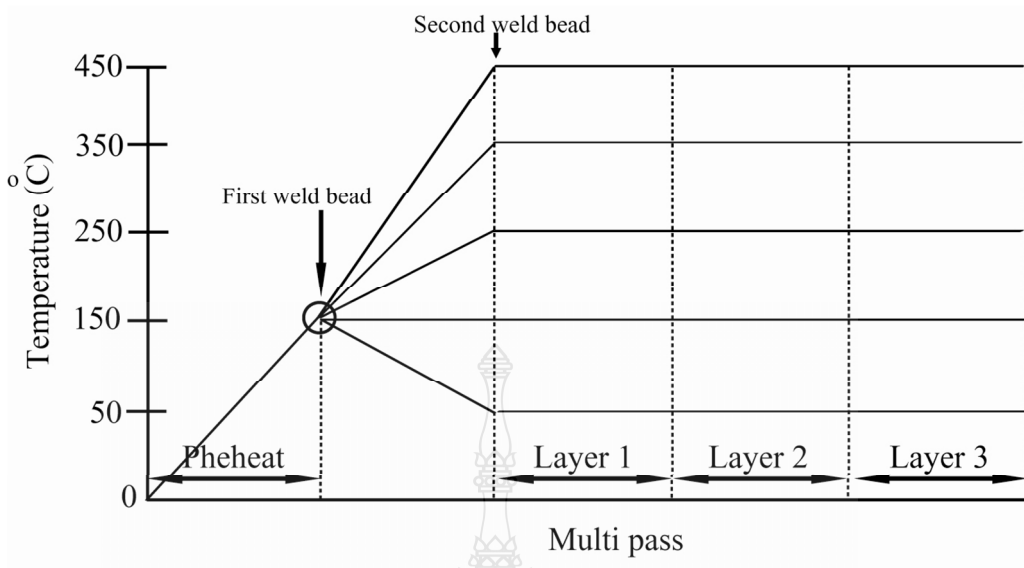
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

การดำเนินการทดลองการเชื่อมพอกผิวแข็ง สามารถแบ่งตัวแปรการเชื่อมออกเป็น 3 กลุ่ม โดยมีรายละเอียดของตัวแปรดังนี้

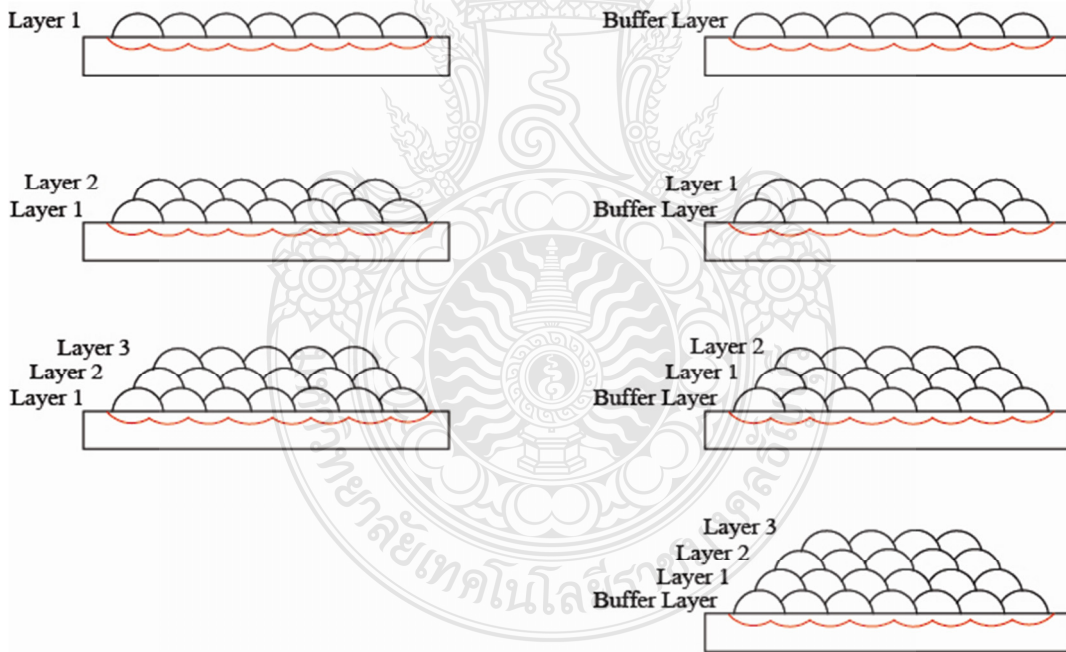
1) อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 5 ระดับ คือ 50°C , 150°C , 250°C , 350°C และ 450°C โดยทำการอุ่นชิ้นงาน (Preheat Temperature) ทดลองเหล็กกล้าคาร์บอนก่อนการเชื่อมแนวที่ 1 ทุกครั้งที่อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานที่ 150°C แสดงดังรูปที่ 3.5 ขั้นตอนออกแบบการเชื่อมชั้นพอกผิวแข็งที่อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมต่างกัน

2) กระแสในการเชื่อม 3 ระดับ คือ 90 A, 100A และ 110 A

3) เชื่อมชั้นพอกผิว 3 ชั้น เชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้นและเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้นแสดงดังรูปที่ 3.6 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานเชื่อม



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเชื่อมชั้นพอกผิวแข็งที่อุณหภูมิระหว่างเที่ยวต่างกัน

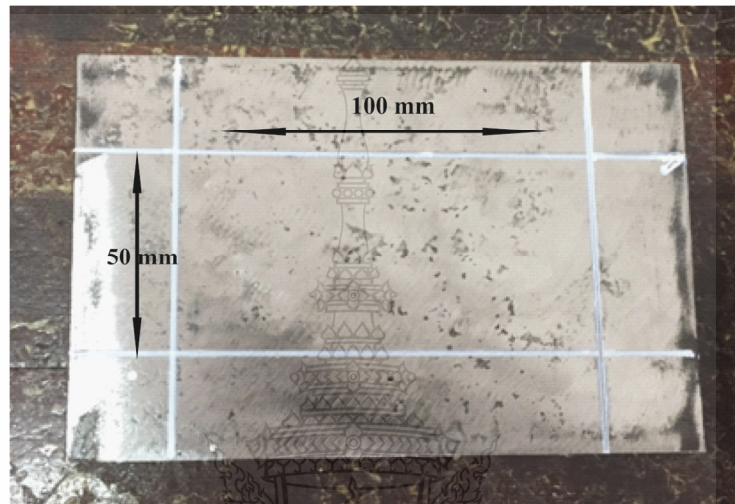


ก) แบบไม่มีชั้นรองพื้น

ข) แบบมีชั้นรองพื้น

รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเชื่อมชั้นพอกผิวแข็ง ก) แบบไม่มีชั้นรองพื้น ข) แบบมีชั้นรองพื้น

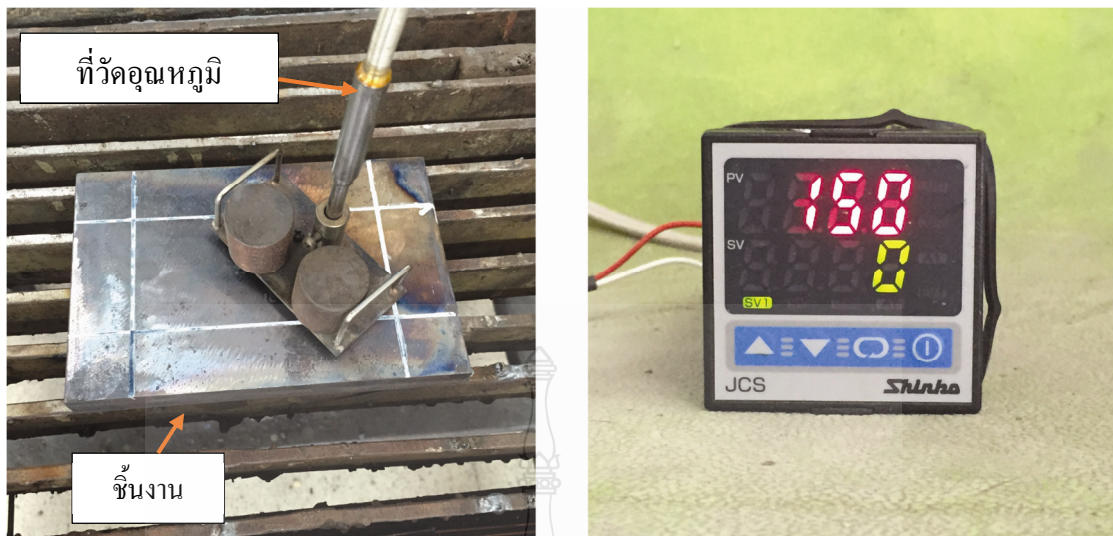
4) การเตรียมชิ้นงานทดลองเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางตามมาตรฐาน JIS-S50C ผิวด้านบนของแผ่นเหล็กถูกทำการเจียรระไนผิวหน้าเพื่อกำจัดผิวคิบจากการรีดร้อนและปรับผิวให้มีความราบเรียบก่อนทำการเชื่อมและทำการกำหนดขอบเขตของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง โดยมีขนาดความกว้าง 50 mm ยาว 100 mm แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การเจียรระไนผิวหน้าเพื่อกำจัดผิวคิบจากการรีดร้อน

3.2.1 ขั้นตอนการทดลองเชื่อม

กระบวนการเชื่อมที่ใช้เชื่อม คือ การเชื่อมอาร์กคลุมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) โดยช่างเชื่อมที่ผ่านการรับรองมาตรฐานจากกรมพัฒนาฝีมือแรงงาน กระทรวงแรงงานทำการเชื่อมในห้องเชื่อมมาตรฐานของบริษัท ภูสุวรรณ อินเตอร์เทรด จำกัด ก่อนการเชื่อมทุกครั้งทำการอุ่นชิ้นงานเชื่อมให้ได้อุณหภูมิ 150°C ดังรูปที่ 3.8 แสดงขั้นตอนการวัดอุณหภูมิหลังจากการอุ่นชิ้นงานด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิดิจิตอล หลังจากนั้นทำการเชื่อมตามตัวแปรการทดลองที่กำหนดโดยช่างเชื่อมแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 การวัดอุณหภูมิหลังจากการอุ่นชิ้นงานด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิดิจิทัล

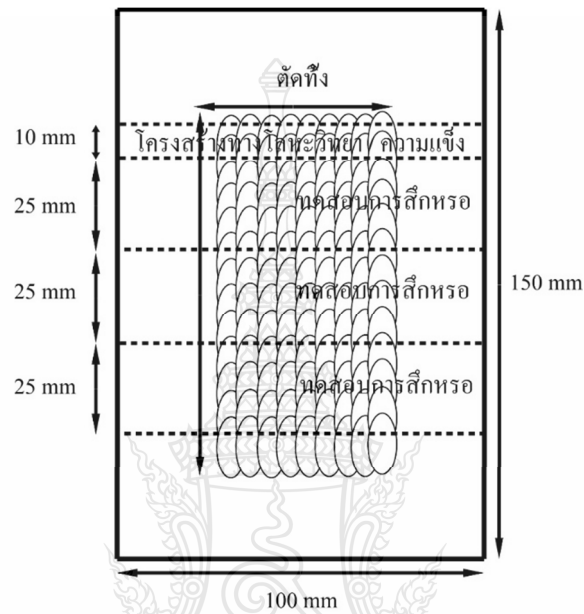


รูปที่ 3.9 รูปขั้นตอนการเชื่อมพอกผิวแข็ง

3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบรอยเชื่อม

1) ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอกผิวแข็งตามตัวแปรที่กำหนดถูกนำมาตัดเป็นชิ้นงานทดสอบ โดยตัดทั้งทางบริเวณจุดเริ่มต้นการเชื่อมและจุดสิ้นสุดของแนวเชื่อมแล้วตัดชิ้นงานทดสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยาและทดสอบความแข็งมีขนาดกว้าง 10 mm 1 ชิ้น และตัดทดสอบการสึกกร่อนโดยมีขนาดความกว้าง 25 mm ทั้งหมด 3 ชิ้น แสดงตัวอย่างการออกแบบการตัดชิ้นทดสอบดังรูปที่ 3.10 กระบวนการตัดชิ้นงานทดสอบใช้กระบวนการตัดแบบไมโครคัตเตอร์ยี่ห้อทางการค้า Metcon Meta Cut-M แสดงดังที่ 3.10 (ก) โดยมีระบบหมุนเวียนน้ำหล่อเย็นเพื่อป้องกันการเกิดความร้อน

ร่อนบริเวณรอยตัด ขั้นตอนการตัดชิ้นงานทดสอบทำการจับยึดชิ้นงานให้แน่นดังรูปที่ 3.11 (ข) จากนั้นทำการกดปุ่มเปิดแสงสว่างหมายเลข 1 แสดงดังรูปที่ 3.11 (ค) และทำการกดปุ่มหมายเลข 2 เปิดปั้มน้ำหล่อเย็นจากนั้นทำการกดปุ่มสตาร์ทหมายเลข 3 และเมื่อทำการตัดชิ้นงานเสร็จแล้วหรือทำการเปลี่ยนใบตัดใหม่ทำการกดปุ่มหมายเลข 4 เพื่อทำการหยุดเครื่องตัดแสดงดังรูปที่ 3.11 (ค)



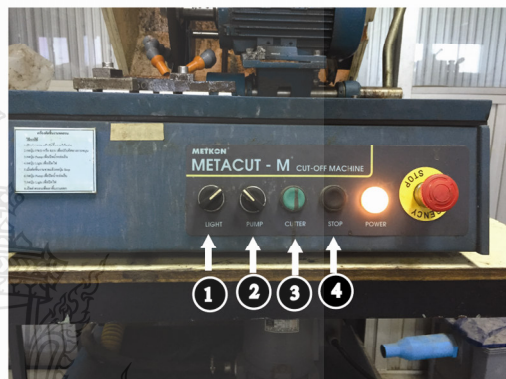
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการออกแบบการตัดชิ้นทดสอบ



ก) เครื่องตัดแบบมีระบบน้ำหล่อเย็น



ข) ขั้นตอนการจับยึดชิ้นงาน



ค) ขั้นตอนการทำงานของเครื่องตัด

รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการตัดชิ้นงานทดสอบ

2) การเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคทำได้โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเรียบร้อยแล้วทำการตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานทดสอบที่มีระบบหมุนเวียนน้ำหล่อเย็น ชิ้นงานที่ได้ถูกนำมาทำการขัดด้วยกระดาษทราย เบอร์ 240-1200 ตามลำดับ สำหรับวิธีการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายวางชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งขวางกับทิศทางการหมุนของจานขัดดังรูปที่ 3.12 (ก) ตรวจสอบความเรียบด้วยสายตา จากนั้นทำการวางชิ้นงานเชื่อมขนานกับทิศทางการหมุนของจานขัดดังรูปที่ 3.12 (ข) และตรวจสอบความเรียบผิวด้วยสายตา ทำการขัดสลับไปมาในกระดาษทรายเบอร์เดียวกันจนได้ความเรียบผิวที่ต้องการและทำการเปลี่ยนเบอร์กระดาษทราย และทำการขัดมันด้วยผงเพชรขนาด 1 ไมโครเมตรจนผิวมันวาว ผิวขัดมันถูกทำการกัดกรด (Etching) ผิวหน้าชิ้นงานเชื่อม ด้วยสารละลายที่มีส่วนผสมประกอบด้วยกรดไนตริก 10 มิลลิลิตร และกรดไฮโดรคลอริก 30 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการกัดกรดประมาณ 60 วินาที ตามมาตรฐาน ASTM E407 จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ยี่ห้อ OLYMPUS BX51M บริเวณที่

กำหนด คือ บริเวณโลหะฐาน (Base Metal) บริเวณกระทบร้อน (Heat-Affect Zone) และบริเวณชั้นแนวเชื่อม (Weld Metal Layer) ชั้นที่ (Layers) 1-3 แสดงดังรูปที่ 3.13

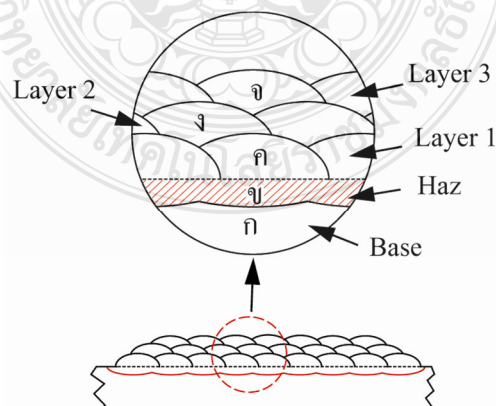
3) การทดสอบความแข็งของผิวแนวเชื่อมพอกผิวแข็งใช้การทดสอบความแข็งจุลภาคแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers Hardness) ใช้ในการทดสอบความแข็งโดยวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM E92-82 [30] โดยทำการทดสอบเป็นเส้นตรงผ่านผิวชั้นแนวเชื่อมชั้นที่ 1 ถึง ชั้นที่ 3 โดยระยะห่างระหว่างจุดทดสอบ 0.4 mm โหลดที่ใช้ในการกดทดสอบ 200 กรัม และเวลาในการกดแช่ 10 วินาที แสดงบริเวณตำแหน่งทดสอบดังรูปที่ 3.14 (ก) และรูปที่ 3.14 (ข) ลักษณะของเครื่องที่ใช้ในการทดสอบความแข็ง



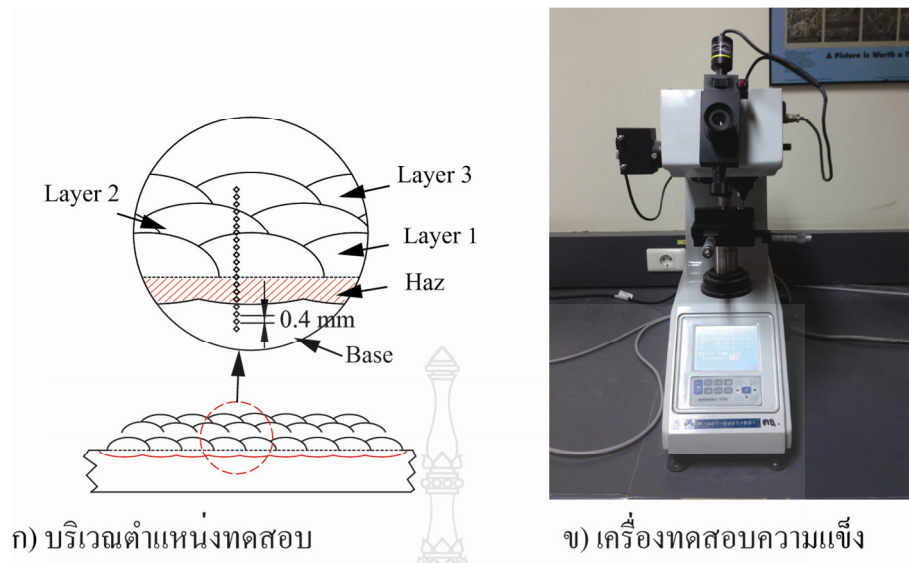
ก) การวางชิ้นงานขวางกับทิศทางการหมุน

ข) การวางชิ้นงานขนานกับทิศทางการหมุน

รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการขีดด้วยกระดาษทราย



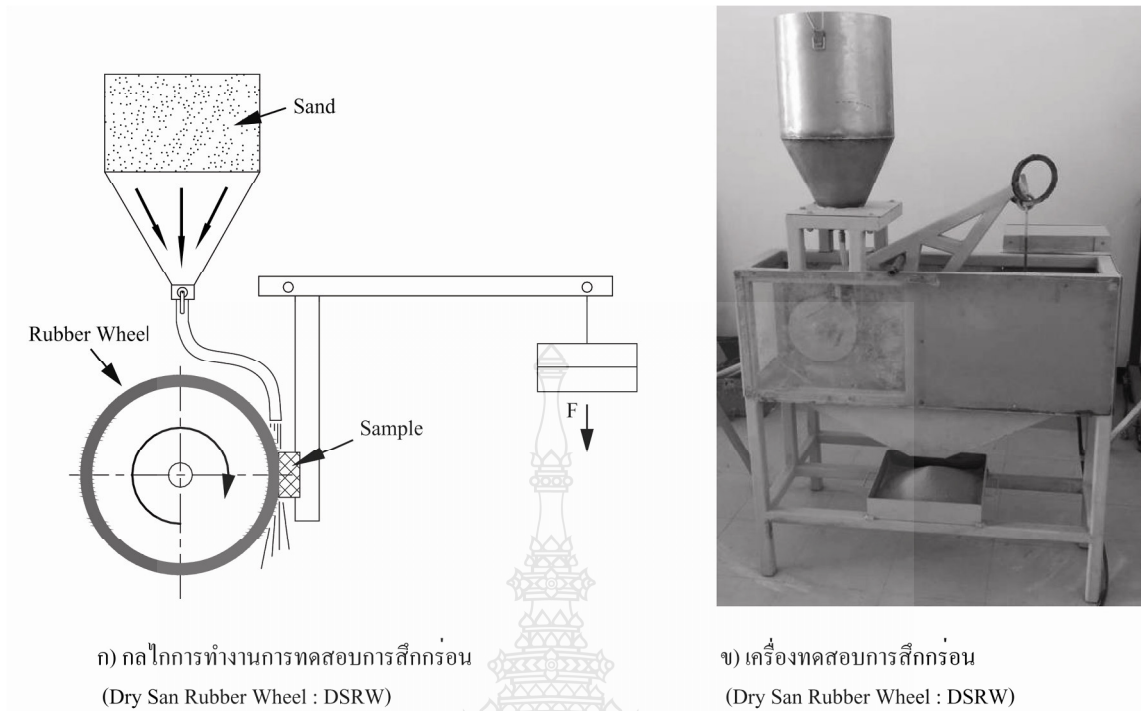
รูปที่ 3.13 ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา



ก) บริเวณตำแหน่งทดสอบ
รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการทดสอบความแข็ง

ข) เครื่องทดสอบความแข็ง

4) การทดสอบอัตราการสึกกร่อนของรอยเชื่อมครั้งนี้เป็นการทดสอบแบบแห้ง (Dry Sand Rubber Wheel :DSRW) ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM G65 แสดงดังรูปที่ 3.15 (ก) ทรายที่ใช้ในการทดสอบเป็นทรายแม่น้ำทำการอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อขจัดความชื้นภายในทราย จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในอุณหภูมิห้อง แล้วจึงทำการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 80 เมช การทดสอบการสึกกร่อนครั้งนี้ ใช้อัตราการไหลของทราย 300-400 กรัมต่อนาที ระยะการทดสอบ 4309 เมตร น้ำหนักที่ใช้กดขึ้นทดสอบ 130 นิวตัน (13 กิโลกรัม) ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ลักษณะเครื่องทดสอบการสึกกร่อนแสดงดังรูปที่ 3.15 (ข)



รูปที่ 3.15 การทดสอบการสึกกร่อน (Dry Sand Rubber Wheel :DSRW) ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM G65 [27]

5) การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและวิเคราะห์ปริมาณธาตุรูปที่ 3.16 ได้แสดงถึงขนาดของชิ้นงานการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและวิเคราะห์ปริมาณธาตุตรวจสอบ โดยจะทำการตรวจสอบตำแหน่งบริเวณพื้นที่หน้าตัดกึ่งกลางแนวเชื่อมพอกผิวแข็งพื้นที่ผิวชั้นที่ 3 ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีจะแบ่งได้เป็น 2 แบบคือการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative-Analysis) จะทำการตรวจสอบในตำแหน่งพื้นที่กำหนด และการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) โดยทำการตรวจสอบในบริเวณพื้นที่เฟสที่มีความแตกต่างกันการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีในงานวิจัยนี้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด

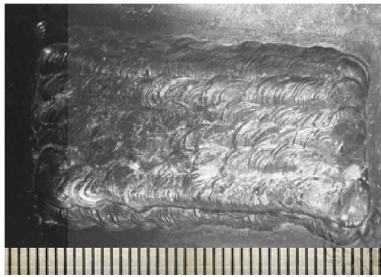


บทที่ 4

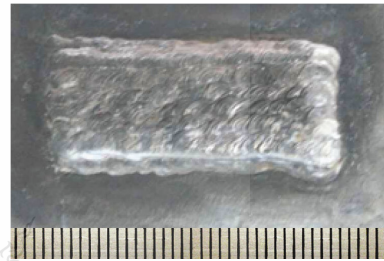
ผลการทดลองและการอภิปรายผลการวิจัย

อิทธิพลของอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อม 50-450 °C ด้วยการเชื่อมพอกผิวแข็ง ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน S50C ด้วยการเชื่อมที่มีการสร้างชั้นรองพื้นและไม่มีชั้นรองพื้นก่อนการเชื่อมพอกผิวแข็งจำนวนชั้นพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้นและใช้กระแสเชื่อมแอมแปร์จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้

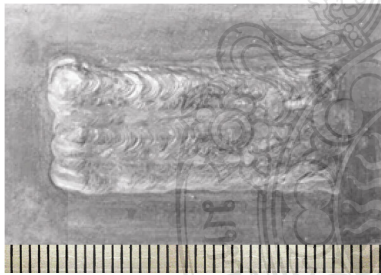
4.1 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อผิวหน้าแนวเชื่อม



ก) พอกผิวแข็งที่กระแสเชื่อม 100 A
อุณหภูมิระหว่างเทียวเชื่อม 150 °C



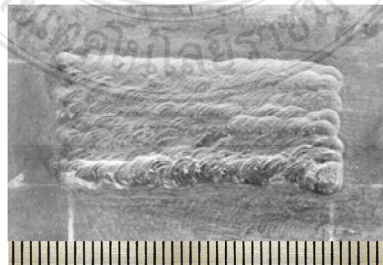
ข) พอกผิวแข็งที่กระแสเชื่อม 100 A
อุณหภูมิระหว่างเทียวเชื่อม 50 °C



ค) พอกผิวแข็งที่กระแสเชื่อม 100 A
อุณหภูมิระหว่างเทียวเชื่อม 250 °C



ง) พอกผิวแข็งที่กระแสเชื่อม 100 A
อุณหภูมิระหว่างเทียวเชื่อม 350 °C



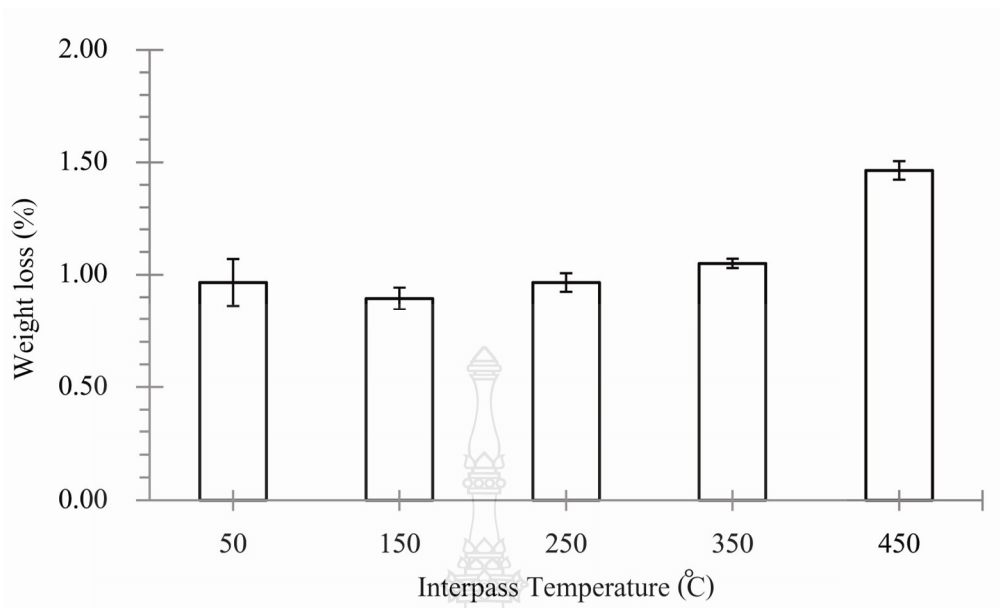
จ) พอกผิวแข็งที่กระแสเชื่อม 100 A
อุณหภูมิระหว่างเทียวเชื่อม 450 °C

รูปที่ 4.1 แสดงผิวหน้าของชิ้นงานที่เชื่อม

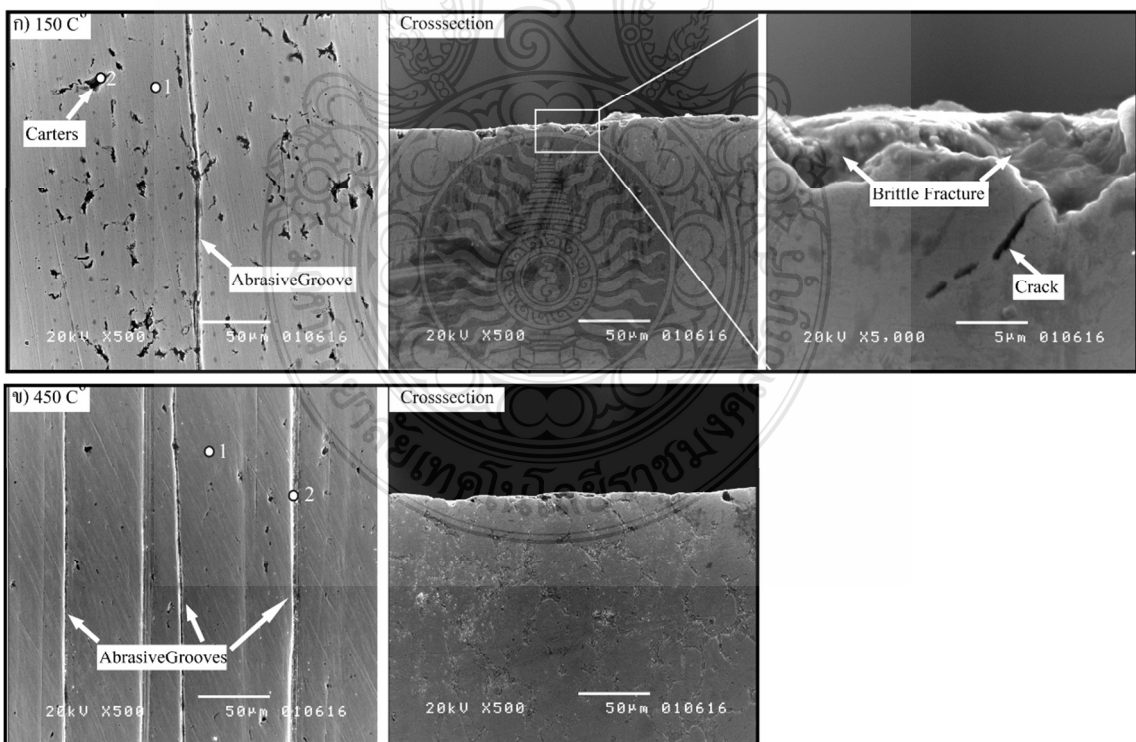
รูปที่ 4.1 แสดงผิวหน้าของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยการเชื่อมอาร์กถวดกระแสเชื่อม 90 แอมแปร์ ที่มีการเชื่อมพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้นบนชิ้นงานที่ได้มีการเชื่อมชั้นรองพื้นและชิ้นงานที่ไม่มีการเชื่อมรองพื้น ผลการตรวจสอบพบว่าผิวหน้าแนวเชื่อมที่เชื่อมพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้นบนชิ้นงานที่ไม่มีการรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) พบผิวหน้าแนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ ไม่เกิดจุดบกพร่องเช่นรูตามดหรือ ความไม่สมบูรณ์ใดๆ บนผิวหน้าแนวเชื่อมที่เชื่อมรองพื้นก่อนเชื่อมสามารถตรวจพบเช่นเดียวกันอย่างไรก็ตามชิ้นงานเชื่อมที่ได้พบว่ามีเม็ดโลหะที่กระเด็นออกจากบ่อหลอมละลายมาเกาะที่พื้นชิ้นงานดัง แสดงด้วยวงกลมในรูปที่ 4.1 (ข)

4.2 ผลการทดสอบอัตราการสึกกร่อนกับอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม

รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบอัตราการสึกกร่อนของรอยเชื่อมที่อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงาน ก่อนการเชื่อม 50-450 °C โดยใช้กระแสเชื่อมที่ บนเหล็กกล้า JIS S50C พบว่าการเชื่อมพอกผิวแข็ง แบบไม่มีชั้นรองพื้นด้วยอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมเริ่มต้นที่ 50 °C มีค่าการสึกกร่อนของการสูญเสีย น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประมาณ 0.96 % และเมื่อทำการทดสอบชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมที่เพิ่มสูงขึ้นคือ 150 °C พบว่ามีแนวโน้มทนต่อการสึกกร่อน สูงที่สุดมีค่าประมาณ 0.89 % โดยแสดงกราฟค่าการอัตราการสึกกร่อนมีแนวโน้มลดลง ขณะที่ทำการ เพิ่มอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นเป็น 250 350 และ 450 °C พบว่ามีแนวโน้มของทนต่อการ สึกกร่อนต่ำตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น 0.96, 1.05 และ 1.46 % ตามลำดับ โดยแสดงกราฟผลการทดสอบ การสึกกร่อนที่ 250-450°C เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม อย่างไรก็ตามชิ้นงานเชื่อมพอกผิว แข็งทำให้เปอร์เซ็นต์ค่าอัตราการสึกกร่อนต่ำกับอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมต่ำ ขณะที่อัตราการสึก กร่อนที่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์สูงตามอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมที่เพิ่มสูงขึ้นอาจเกิดจากการความแตกต่าง ของโครงสร้างจุลภาค [15]



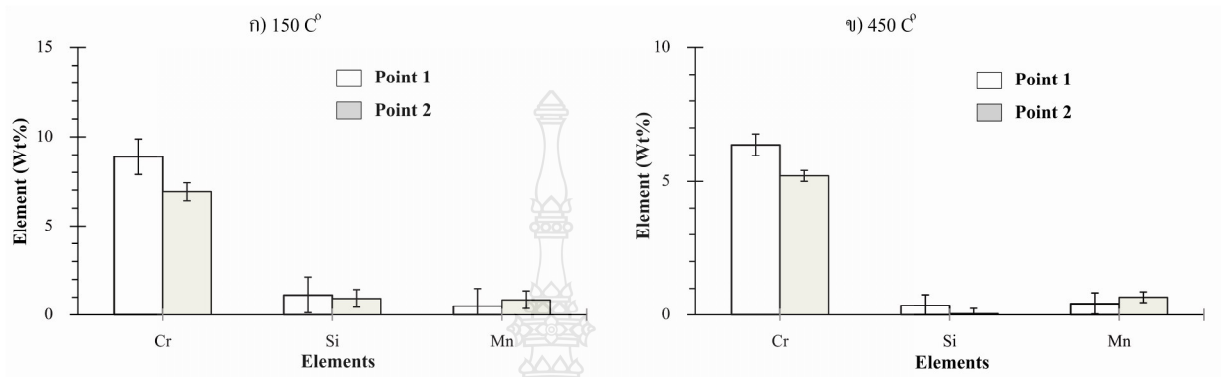
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกกร่อนกับอุณหภูมิระหว่างเที่ยวเชื่อมการเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้น



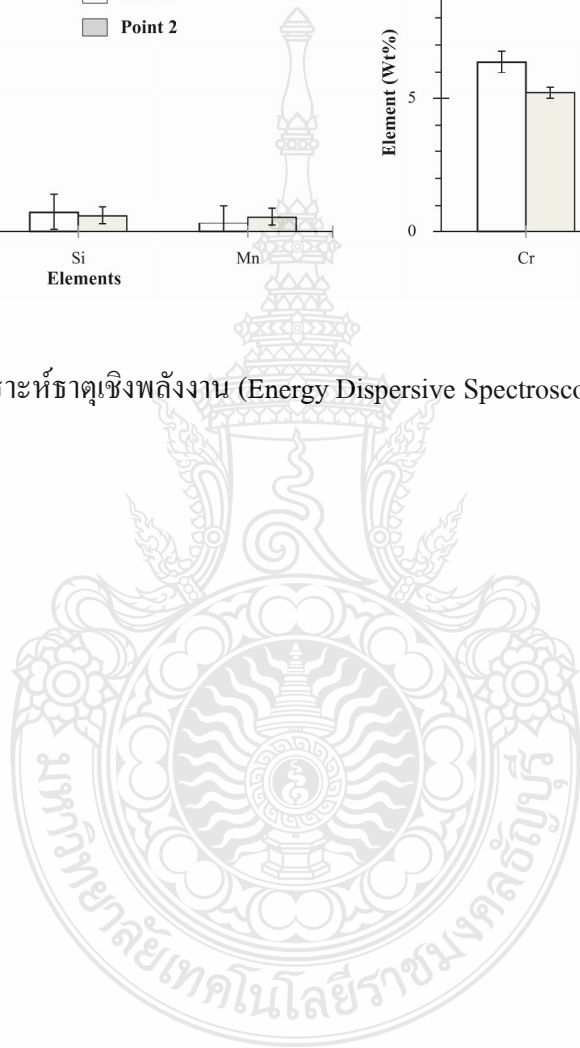
รูปที่ 4.3 ผลการตรวจสอบภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope : SEM)

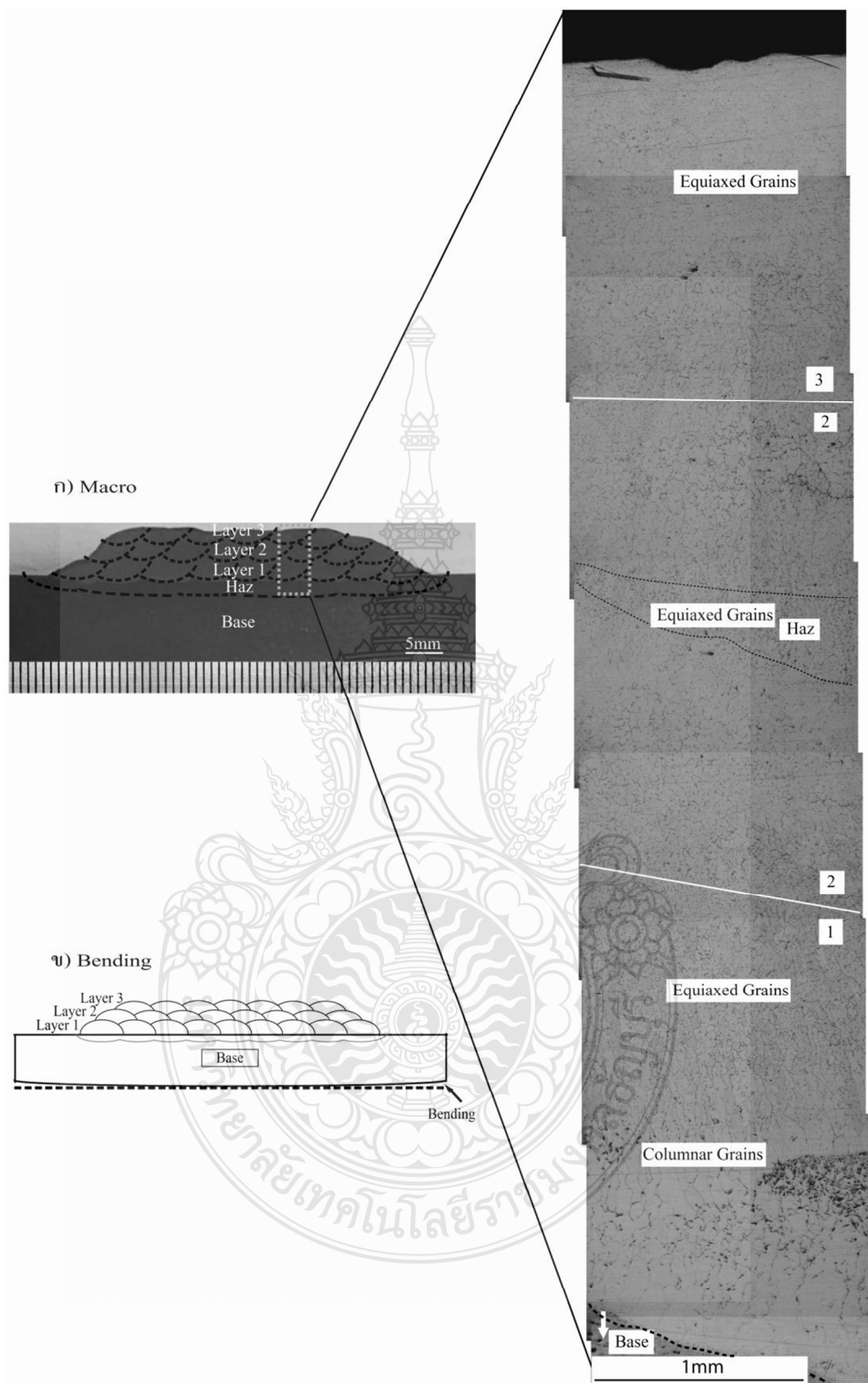
รูปที่ 4.3 แสดงรอยของการสึกกร่อน (Wear Trace) ด้วยการตรวจสอบด้วยภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 500 เท่า ในการเชื่อมอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 50-450 °C กระแสเชื่อม 100 A พบว่าชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ให้ค่าอัตราการสึกกร่อนต่ำที่สุด คือ อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150 °C แสดงดังรูปที่ 4.3 (ก) ลักษณะของรอยสึกกร่อนมีลักษณะเป็นหลุม (Craters) [16] เล็กใหญ่กระจายปะปนอยู่ทั่วบนผิวรอยสึกกร่อนนอกจากนั้นยังพบลักษณะรอยการสึกกร่อนเกิดขึ้นเป็นร่อง (Grooves)[16] ตามทิศทางการไหลของทรายแสดงดังลูกศรชี้ในรูปที่ 4.3 (ก) อย่างไรก็ตามการเกิดหลุมเล็กใหญ่บนผิวรอยสึกกร่อนเกิดจากการเคลื่อนที่ของคาร์ไบด์ [16] และเมื่อทำการตรวจสอบรอยสึกกร่อนบริเวณหน้าตัดขวาง (Cross-section) ของผิวสึกกร่อนดังรูปที่ 4.3 (ก Cross-section) พบว่ามีลักษณะเป็นหลุมตามขอบผิวการสึกกร่อนและเมื่อทำการตรวจสอบด้วยกำลังขยาย 5000 เท่า บริเวณรอยหลุมสึกกร่อนบริเวณเส้นสี่เหลี่ยมสีขาว พบว่า ลักษณะรอยสึกกร่อนมีลักษณะการพังทลายแบบเปราะ (Brittle Fracture) [17] และเกิดรอยแตก (Crack) [17] แสดงดังลูกศรสีขาวชี้ และเมื่อทำการตรวจสอบชิ้นงานเปรียบเทียบกับชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ให้ค่าอัตราการสึกกร่อนสูงที่อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 450 °C พบว่าลักษณะผิวการสึกกร่อนมีลักษณะเป็นร่องหลายเส้นตามทิศทางการหมุนของล้อขัดและการไหลของทรายเป็นดังรูปที่ 4.3 (ข) ลูกศรชี้ และตรวจสอบบริเวณหน้าตัดขวางของผิวสึกกร่อนพบว่ามีลักษณะของรอยหลุมเล็ก อย่างไรก็ตามได้ทำการตรวจสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive Spectroscopy:EDS) บริเวณรอยหลุมและร่องสึกกร่อนและพื้นที่เรียบบริเวณผิวสึกกร่อน พบว่า ชิ้นงานที่ให้ค่าอัตราการสึกกร่อนต่ำ คือ อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150 °C พบว่า บริเวณพื้นที่ผิวสึกกร่อนแบบเรียงดังตำแหน่งการตรวจสอบ Point 1 รูปที่ 4.3 (ก) มีปริมาณของธาตุโลหะ คือ โครเมียม (Cr) ซิลิกอน (Si) และแมงกานีส (Mn) สูงกว่าบริเวณพื้นที่ผิวสึกกร่อนแบบหลุมแสดงตำแหน่งการตรวจสอบ Point 2 รูปที่ 4.3 (ก) และแสดงผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานดังรูปที่ 4.4 (ก) และเมื่อทำการตรวจสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีค่าอัตราการสึกกร่อนสูงบริเวณผิวของการสึกกร่อนพบว่าตำแหน่งการตรวจสอบ Point 1 บริเวณพื้นที่เรียบดังรูปที่ 4. (ข) มีปริมาณของธาตุโครเมียม ซิลิกอนและแมงกานีส สูงกว่าตำแหน่งการตรวจสอบ Point 2 รูปที่ 4.3 (ข) โดยแสดงผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานดังรูปที่ 4.4 (ข) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมของธาตุ โครเมียม ซิลิกอน และแมงกานีสของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150 °C ที่มีอัตราการสึกกร่อนต่ำ และชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 450 °C ที่มีอัตราการสึกกร่อนสูง

พบว่าอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150 °C มีปริมาณของธาตุโครเมียม ซิลิกอนและแมงกานีสสูงกว่า และส่งผลต่อการสึกกร่อนต่ำ



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive Spectroscopy:EDS)



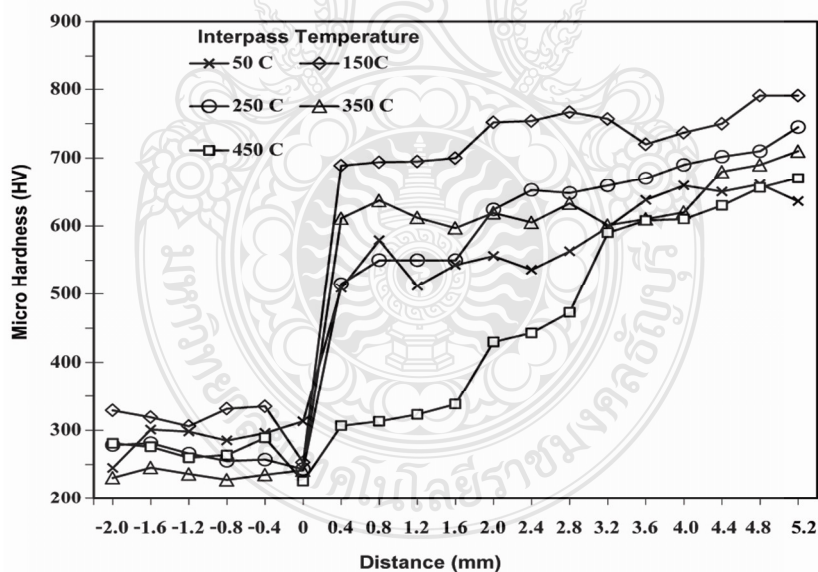


รูปที่ 4.5 การตรวจสอบโครงมหภาคแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่กระแสเชื่อม 100 A อุณหภูมิระหว่าง
 เที้ยวเชื่อม 150 °C

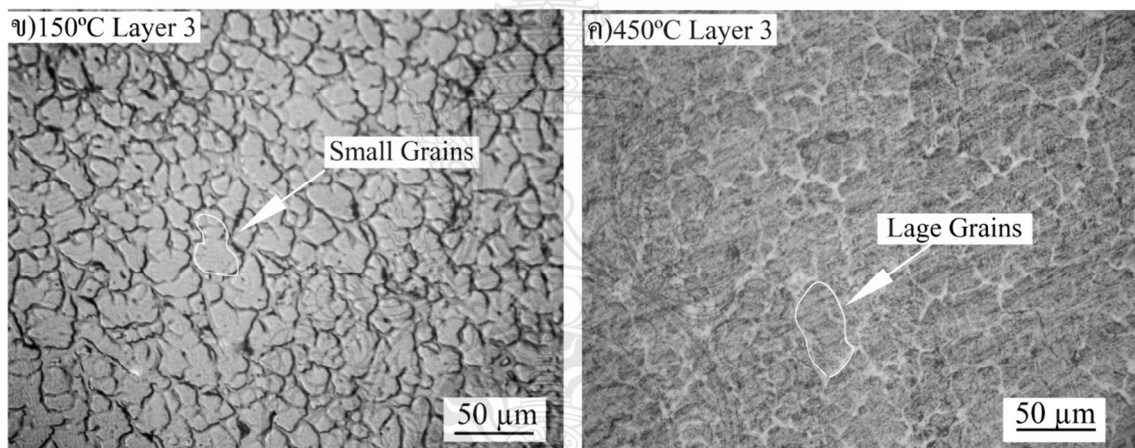
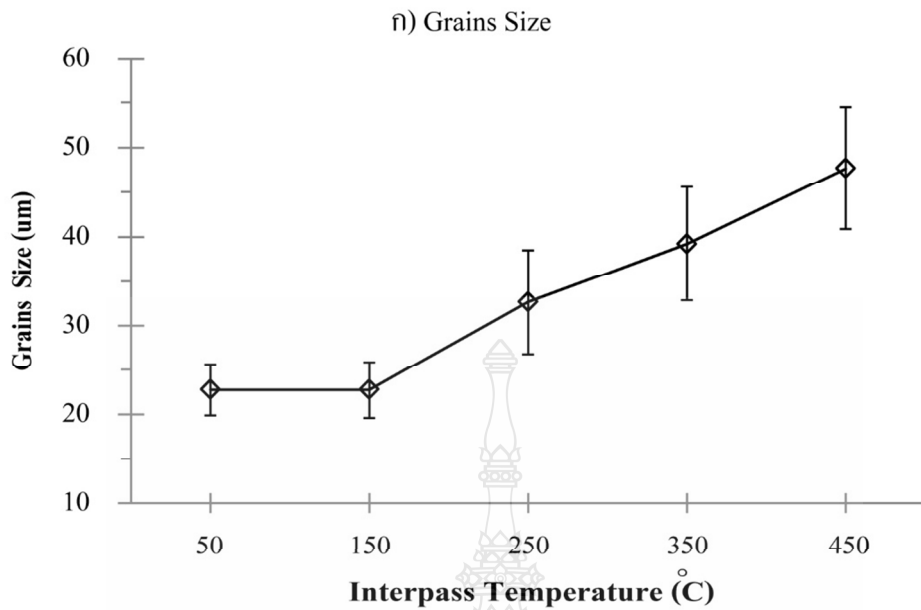
รูปที่ 4.5 (ก) แสดงการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งกระแสเชื่อม 100 A กับอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม 150 °C ที่ผ่านตัดขวางแนวเชื่อมชั้นพอกผิวแข็ง การตรวจสอบพบว่าผิวหน้ารอยเชื่อม (Weld face) แนวเชื่อมมีการเกยทับของแต่ละแนวเชื่อมมีความสม่ำเสมอ และไม่พบจุดบกพร่องชนิดรู (Void) ภายในรอยเชื่อมของชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 1-3 ที่เกิดจากการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ ส่วนแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่อุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม 50 °C และ 250-450 °C ไม่พบจุดบกพร่องเช่นกันแสดงรูปดังในภาคผนวก ก และทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 50 เท่า ที่แสดงตำแหน่งบริเวณตรวจสอบด้วยเส้นปะจากด้านบนของชั้นที่ 3 ลงมาผ่านชั้นที่ 2 และชั้นที่ 1 จนถึงบริเวณขอบรอยต่อระหว่างโลหะเชื่อมกับโลหะฐาน พบว่า บริเวณแนวเชื่อมชั้นที่ 3 กับ ชั้นที่ 2 พบว่าบริเวณนี้เกรนมีความกลมสม่ำเสมอ (Equiaxed Grains) และเมื่อสังเกตบริเวณของแนวเชื่อมชั้นที่ 2 ที่บริเวณแนวเชื่อมถูกเชื่อมซ้อนทับแนว (Multipass) จนเกิดบริเวณพื้นที่เล็กๆ เรียกว่าบริเวณกระทบร้อน (Haz) [16] พบว่าลักษณะของเกรนมีความละเอียดเพิ่มมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.8 (ก) ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยขนาดเม็ดเกรนที่มีความละเอียดอาจส่งผลต่อค่าความแข็งที่ทำการทดสอบเพิ่มขึ้นบริเวณกระทบร้อน (Haz) และเมื่อทำการตรวจสอบมาถึงบริเวณจุดเริ่มต้นรอยต่อระหว่างโลหะเชื่อมกับโลหะฐาน พบว่าเกรนมีรูปร่างใหญ่และเรียวยาว (Columnar Grains) ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าความแข็งบริเวณเฟสนี้ต่ำในการเชื่อมพอกผิวแข็งของ Fe-Cr-C [17] ขณะที่ทำการตรวจสอบด้วยสายตาของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่อุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม 50-450 °C พบว่า ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ผ่านการเชื่อมด้วยอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมต่างกัน ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งเกิดการแอ่นตัว โค้งงอเกิดขึ้นทั้งสองด้านแสดงรูปจำลองการแอ่นตัว โค้งงอดังรูปที่ 4.5 (ข) และทำการวัดการแอ่นตัว โค้งงอของอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม 50-450 °C พบว่า มีค่าการแอ่นตัว โค้งงอมีค่าประมาณ 1 องศา ทุกอุณหภูมิระหว่างเทียวย

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการทดสอบความแข็งของอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม 50-450°C การเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้นที่กระแสเชื่อม 100A พบว่า ที่ตำแหน่งการทดสอบ 0 คือบริเวณเส้นรอยต่อระหว่างโลหะเชื่อมกับโลหะฐาน มีค่าความแข็งประมาณ 220 -300 HV และเมื่อทำการกดทดสอบลงไปจนเข้าใกล้โลหะฐานประมาณ -2 พบว่าค่าความแข็งของทุกสถานะอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมมีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการกดทดสอบบริเวณโลหะเชื่อมของชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 ที่บริเวณตำแหน่งตั้งแต่ 0 ถึง 1.6 พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อทำการกดทดสอบเข้าใกล้ชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 จนถึงชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 ที่บริเวณตำแหน่งกดทดสอบ 1.6 ถึง 5.2 พบว่าค่าความแข็งของอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมทุกสถานะมีค่าความแข็งแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามจำนวนชั้นพอกผิวแข็งที่เพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีค่าความแข็งสูงสุดคืออุณหภูมิ

ระหว่างที่เชื่อมที่ 150 °C มีค่าความแข็งของผิวพอกแข็งประมาณ 790 HV การที่มีค่าความแข็งของชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 กับชั้นที่ 3 ต่างกันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดรูปร่างของเม็ดเกรนที่ต่างกันบริเวณชั้นพอกผิวแข็งส่งผลต่อค่าความแข็งต่างกันดังแสดงรูปร่างของเม็ดเกรนที่ต่างกันดังรูปที่ 4.7 (ก) และความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของระดับการเจือจาง [18] ในชั้นโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งส่งผลต่อความแข็งต่างกัน อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งของผิวพอกแข็งที่อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมต่างกันพบว่า อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมส่งผลต่อค่าความแข็งในโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งต่ำ อย่างไรก็ตามได้ทำการตรวจสอบวัดขนาดของเม็ดเกรนของอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 50-450°C แสดงดังรูปที่ 4.8 (ก) แสดงกราฟการเปรียบเทียบการวัดขนาดเม็ดเกรนของโลหะเชื่อมชั้นที่ 3 ด้วยโปรแกรม Image J พบว่า การเชื่อมที่มีอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมต่ำ 50 และ 150 °C พบว่าขนาดของรูปร่างของเม็ดเกรนมีขนาดเล็ก (Small Grains) ประมาณ 22 μm กระจายตัวสม่ำเสมอบริเวณโลหะเชื่อมชั้นที่ 3 แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4.8 (ข) ขณะที่การเชื่อมที่ให้อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมสูงตั้งแต่ 250 -450 °C การตรวจสอบพบว่าขนาดรูปร่างของเม็ดเกรนมีแนวโน้มขนาดใหญ่ขึ้น วัดขนาดของเม็ดเกรนมีค่าเฉลี่ยประมาณสูงสุดประมาณ 47 μm ที่อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 450 °C แสดงดังรูปที่ 4.6 (ค) ตามลำดับ



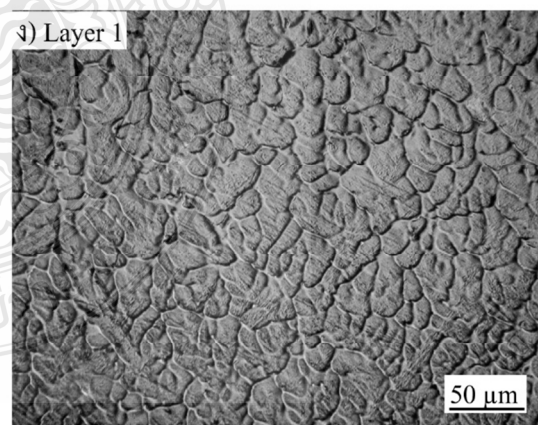
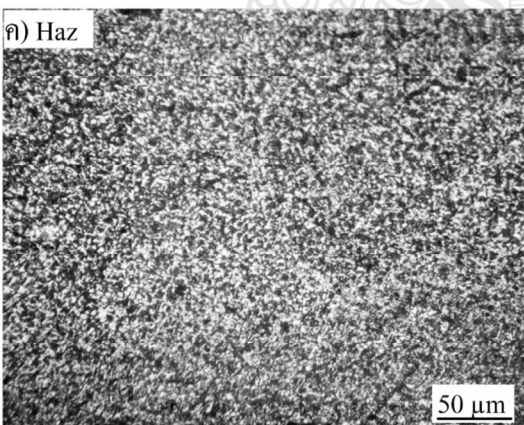
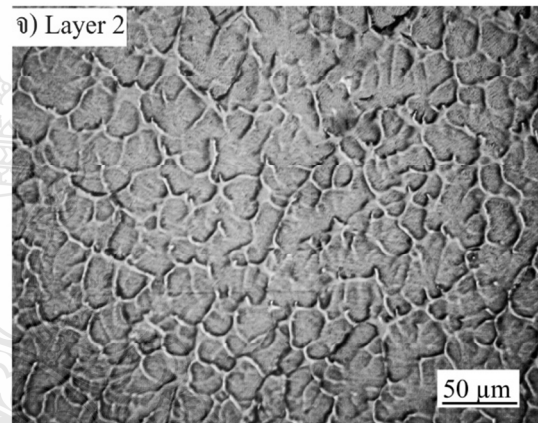
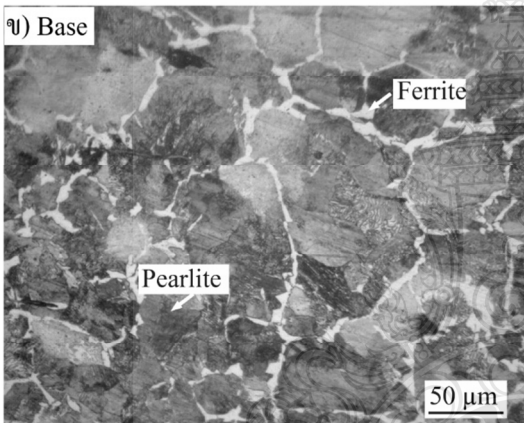
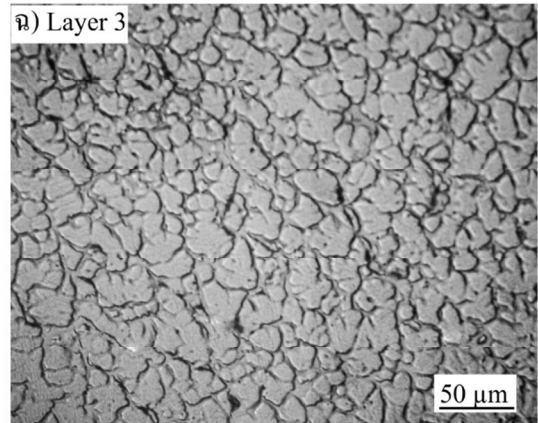
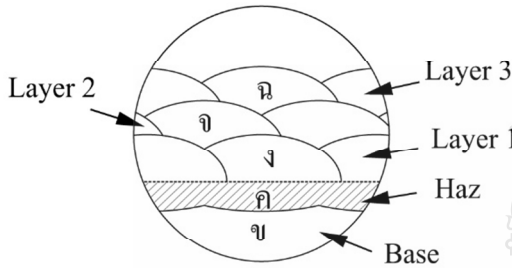
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบความแข็งของอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 50-450°C การเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้น



รูปที่ 4.7 การวัดขนาดรูปร่างของเม็ดเกรน (ก) ขนาดเม็ดเกรน (ข) บริเวณโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150 °C และ(ค) บริเวณโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 450 °C

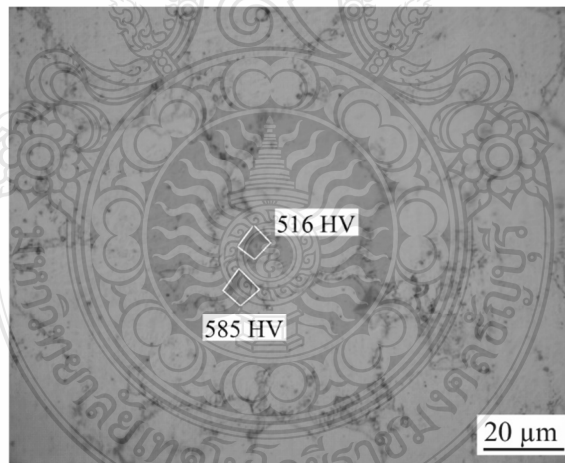
รูปที่ 4.8 (ก) แสดงตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีค่าอัตราการสีก่อนต่ำ คืออุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150 °C ที่ใช้กระแสในการเชื่อม 100 A พบว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะขึ้นงาน เกิดโครงสร้างเฟสเพิร์ลไรต์และเฟสเฟอร์ไรต์ [19] ดังลูกศรสีขาวชี้แสดงดังรูปที่ 4.8 (ข) และเมื่อตรวจสอบบริเวณพื้นที่กระทะร้อนของโลหะเชื่อม พบเฟสเฟอร์ไรต์ และเฟสเพิร์ลไรต์มีขนาดเล็กกลางที่ขนาดของเฟสเล็กกลางเกิดความร้อนจากการเชื่อมส่งผลให้ขนาดและรูปร่างของเฟสเฟอร์ไรต์และบริเวณพื้นที่กระทะร้อนมีขนาดเล็กละเอียดและกระจายตัวทั่ว

ทั้งพื้นที่กระทบร้อน [20] ดังรูปที่ 4.8 (ค) บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld) ชั้นที่ 1 รูปที่ 4.8 (ง) ตรวจสอบปรากฏโครงสร้างแบบเดนไดรต์ บริเวณขอบเกรนปรากฏเฟสโครเมียมคาร์ไบด์มีลักษณะคล้ายกิ่งก้าน
 ก) ตำแหน่งการตรวจสอบ

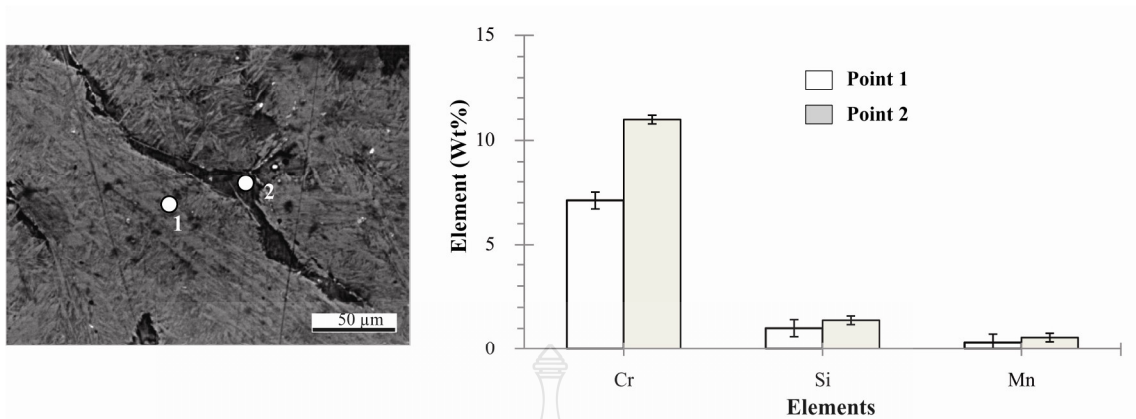


รูปที่ 4.8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพอกผิวแข็ง 3 ชั้น อุณหภูมิระหว่างเชื่อม 150 °C ที่ใช้กระแสในการเชื่อม 100 A

ของต้นไม้ลักษณะการกระจายตัวของเกรนไม่สม่ำเสมอ รูปที่ 4.8 (จ) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมชั้นที่ 2 ลักษณะเกรนที่ลักษณะเรียว ปราบกฎเฟสโครเมียมคาร์ไบด์กระจายในโครงสร้าง รูปที่ 4.8 (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมชั้นที่ 3 ลักษณะเกรนมีขนาดเล็กกลมบริเวณขอบเกรน ปราบกฎเฟสโครเมียมคาร์ไบด์สีขาวมีขนาดที่เล็กและยาวแทรกอยู่ตามขอบเกรน อย่างไรก็ตามได้ทำการทดสอบความแข็งบริเวณโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมชั้นที่ 3 โดยใช้แรงในการกดทดสอบ 25 gf บริเวณพื้นที่ที่ปราบกฎเฟสสีขาวแทรกตัวตามขอบเกรน พบว่ามีความประมาณ 585 HV ขณะที่ทำการกดสอบบริเวณพื้นที่ที่ไม่มีเฟสสีขาวแทรกตัวตามขอบเกรนพบว่ามีค่าความแข็งประมาณ 516 HV แสดงดังรูปที่ 4.8 อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งพบว่าพื้นที่ที่ปราบกฎเฟสสีขาวแทรกตัวตามขอบเกรนมีค่าความสูงกว่าบริเวณพื้นที่ที่ไม่มีเฟสสีขาวแทรกตัวตามขอบเกรน และรูปที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150 °C ที่ใช้กระแสในการเชื่อม 100 A ที่บริเวณพื้นที่ที่ไม่มีเฟสสีขาว Point 1 พื้นที่เฟสสีขาวขอบเกรนตำแหน่งทดสอบ Point 2 แสดงดังรูปที่ 4.9 และผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน พบว่าพื้นที่เฟสสีขาวขอบเกรนตำแหน่งทดสอบ Point 2 มีปริมาณธาตุโครเมียม ซิลิกอน และแมงกานีส สูงกว่าบริเวณพื้นที่ที่ไม่มีเฟสสีขาว Point 1 อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของธาตุโครเมียม ส่งผลต่อค่าความแข็งสูง [19]



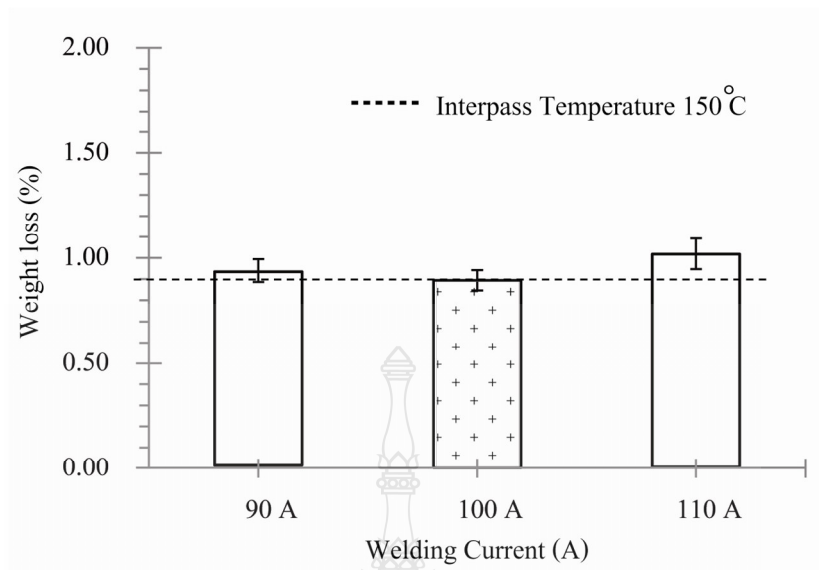
รูปที่ 4.9 รอยกดทดสอบความแข็งโครงสร้างพอกผิวแข็ง 3 ชั้น อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150 °C ที่ใช้กระแสในการเชื่อม 100 A



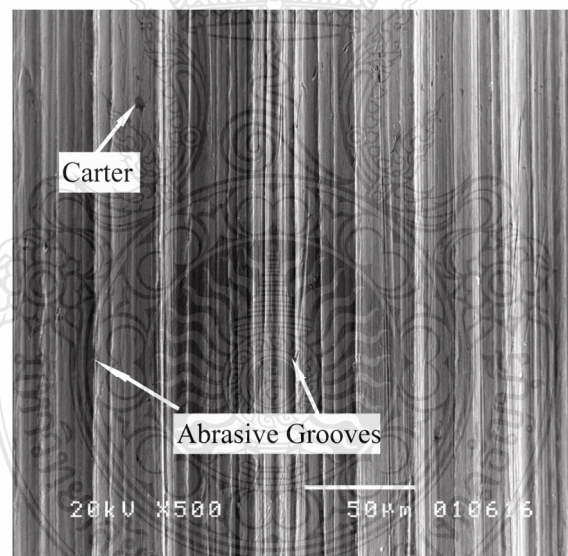
รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน โลหะเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 อุณหภูมิระหว่างที่เยวเชื่อม 150 °C ที่ใช้กระแสในการเชื่อม 100 A

4.3 เปรียบเทียบการทดสอบอัตราการสึกกร่อนกับกระแสเชื่อม

รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างอัตราการสึกกร่อนกับกระแสที่ใช้ในการเชื่อม 90 และ 110A โดยนำอุณหภูมิระหว่างที่เยวเชื่อม 150 °C ที่ผ่านเชื่อมด้วยกระแส 100 A ที่ให้ค่าอัตราการสึกกร่อนต่อชิ้นงานเชื่อมต่ำ และดีที่สุด ผลการทดสอบพบว่า เมื่อทำการทดสอบชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่กระแสเชื่อมต่ำ คือ กระแสเชื่อม 90 พบว่า อัตราการสึกกร่อนมีค่าแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นกว่าชิ้นงานที่ผ่านเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 100A โดยมีค่าอัตราการสึกกร่อนของชิ้นงานคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประมาณ 0.92 % อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดลองเชื่อมด้วยกระแสที่เพิ่มสูงขึ้นคือ กระแสเชื่อม 110A แล้วทำการทดสอบอัตราการสึกกร่อนพบว่า อัตราการสึกกร่อนมีค่าแนวโน้มสูงกว่าการใช้กระแสเชื่อม 90 และ 100 A โดยมีค่าอัตราการสึกกร่อนของกระแสเชื่อม 110A มีค่าอัตราการสึกกร่อนประมาณ 1.01 % อย่างไรก็ตามการที่กระแสเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นมีผลต่ออัตราการสึกกร่อนสูง อาจส่งต่อขนาดและรูปร่างของเม็ดเกรนมีผลต่ออัตราการสึกกร่อนซึ่งคล้ายกับการที่อุณหภูมิระหว่างที่เยวเชื่อมสูงผลของอัตราการสึกกร่อนมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิดังรูปที่ 4.6 (ก) และรูปที่ 4.11 แสดงรอยของการสึกกร่อนกระแสเชื่อม 90 A อุณหภูมิระหว่างที่เยวเชื่อม 150 °C ด้วยการตรวจสอบด้วยภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าผิวรอยสึกกร่อนเกิดขึ้นเป็นร่องและเส้น ตามทิศทางการไหลของทรายทดสอบดังลูกศรชี้ และพบรอยสึกกร่อนมีลักษณะเป็นหลุมมีจำนวนน้อยบนผิวการสึกกร่อน ขณะที่ทำการตรวจสอบจุดบกพร่องในรอยเชื่อมที่ผ่านการตัดขวางแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแสดงดังรูป 4.12 (ก) กระแสเชื่อม 90 A (ข) กระแสเชื่อม 110 A การตรวจสอบของแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ไม่พบจุดบกพร่องใดๆ ปรากฏเกิดขึ้นบนผิวแนวเชื่อม

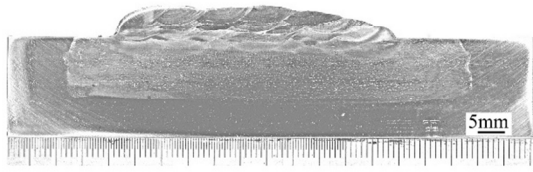


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกกร่อนกับกระแสเชื่อม 90-110A กำหนดอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150 °C

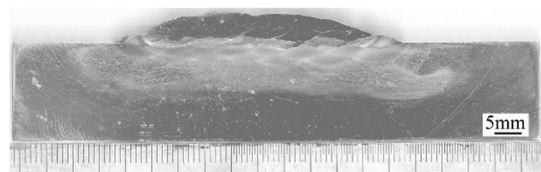


รูปที่ 4.12 ผลการตรวจสอบภาพถ่ายผิวสึกกร่อนกระแสเชื่อม 90 A อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150 °C ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาว

ก) กระแสเชื่อม 90A

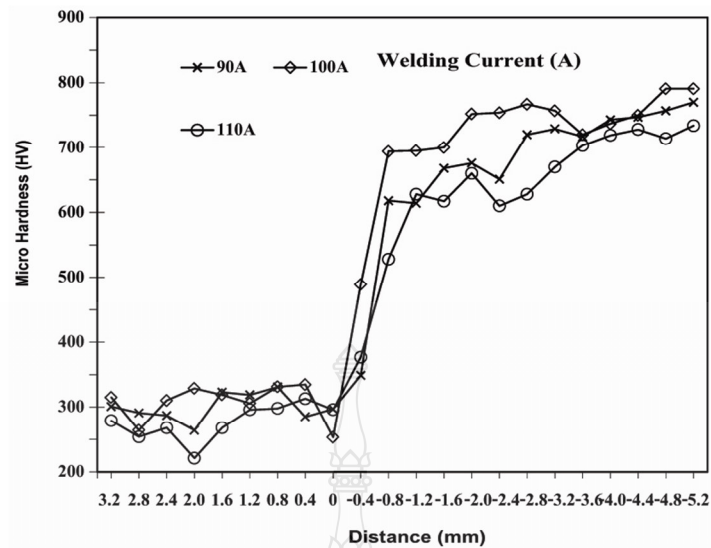


ข) กระแสเชื่อม 110A



รูปที่ 4.13 โครงสร้างมหภาคที่อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150 °C (ก) กระแสเชื่อม 90 A (ข) กระแสเชื่อม 110 A

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อม 90-110 A กับค่าความแข็งที่มีอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150°C การเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้น พบว่าที่ตำแหน่งการทดสอบ 0 บริเวณเส้นหลอมละลายระหว่างโลหะเชื่อมกับโลหะชิ้นงานมีค่าความแข็งประมาณ 250-300 HV ของการเชื่อมด้วยกระแส 90-110A และเมื่อทำการทดสอบจนถึงระยะการทดสอบที่ 3.2 ของทั้งสามกระแสเชื่อมพบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มสูงและลดต่ำลงจนทดสอบเข้าใกล้บริเวณโครงสร้างโลหะชิ้นงานและเมื่อทำการทดสอบความแข็งที่บริเวณตำแหน่ง 0.4 ถึง 1.6 พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มสูงเมื่อทำการเชื่อมโลหะพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 ของกระแสเชื่อมทั้งสามกระแส อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดสอบความแข็งเข้าใกล้บริเวณตำแหน่งของชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบความแข็งที่มีผลต่อกระแสเชื่อมพบว่าการเชื่อมด้วยกระแสไฟที่สูงส่งผลต่อค่าความแข็งลดต่ำลงค่าความแข็งที่สูงสุดของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 คือ กระแสเชื่อม 100 A มีค่าความแข็งของชั้นที่ 3 ประมาณ 790 HV ดังรูปที่ 4.14



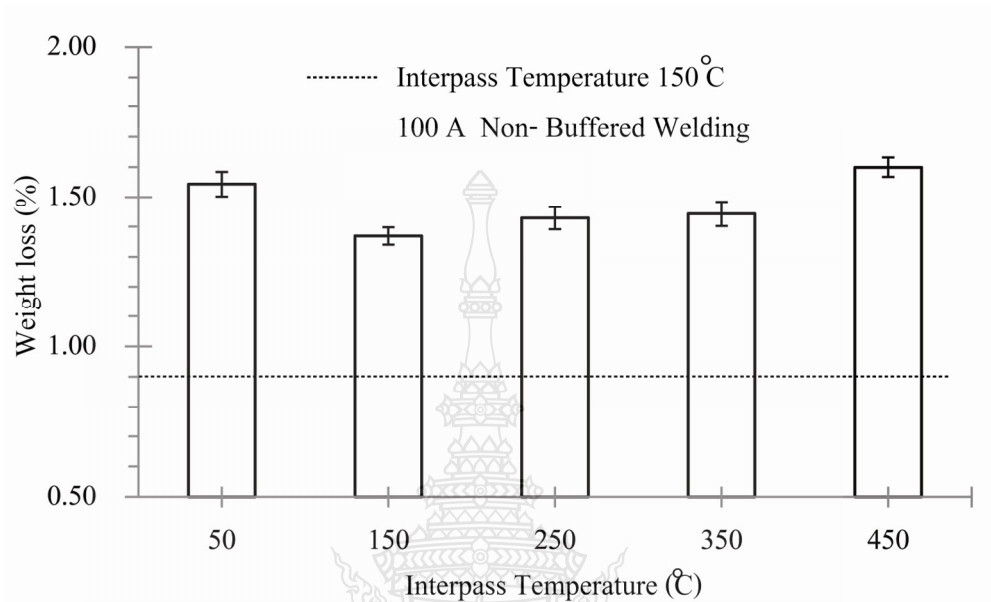
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมกับค่าความแข็ง ที่อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150°C การเชื่อมแบบ ไม่มีชั้นรองพื้น

สรุปการหาตัวแปรการเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้น โดยมีอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 50-450 °C และมีกระแสในการเชื่อม 90-110 A และทำการทดสอบหาค่าอัตราการสึกกร่อนพบว่า ตัวแปรที่ให้ค่าอัตราการสึกกร่อนต่ำที่สุด คือ การเชื่อมที่กระแสเชื่อม 100 A อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150 °C ดังนั้นได้นำตัวแปรที่ดีที่สุด คือ กระแสเชื่อม 100 A มาทำการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีชั้นรองพื้นและทำการทดสอบ โดยแสดงผลในหัวที่ 4.4 ต่อไป

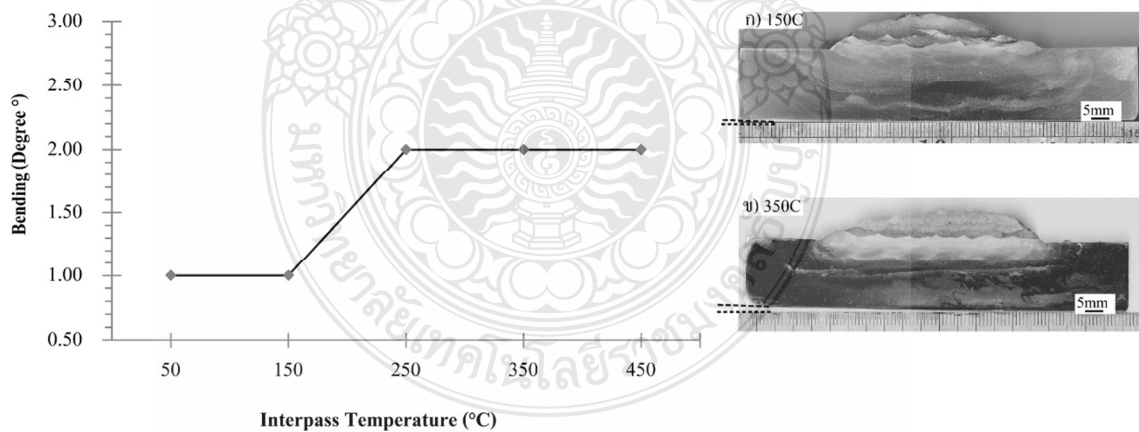
4.4 ผลการทดสอบอัตราการสึกกร่อนของการเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีชั้นรองพื้น

รูปที่ 4.15 แสดงกราฟผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิระหว่าง 50-450 °C กับอัตราการสึกกร่อนการเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้น ผลการทดสอบพบว่า การเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้นที่อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 50 °C มีค่าการสูญเสียอัตราการสึกกร่อนคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ประมาณ 1.54 % ของชิ้นทดสอบ และเมื่อทำการทดสอบชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมที่ 150 °C ผลการทดสอบการสูญเสียอัตราการสึกกร่อนของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง และเมื่อทำการทดสอบชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 250 350 และ 450 °C ผลการทดสอบพบว่า อัตราการสึกกร่อนสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการสึกกร่อนการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มีชั้นรองพื้นพบว่า การเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้นที่ให้ค่าอัตราการสึกกร่อนต่ำ ดีที่สุด คือ อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม

150 °C มีค่าเปอร์เซ็นต์อัตราการสึกกร่อนสูงกว่าชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มีชั้นรองพื้นแสดงการเปรียบเทียบดังเส้นปะในรูปที่ 4.15



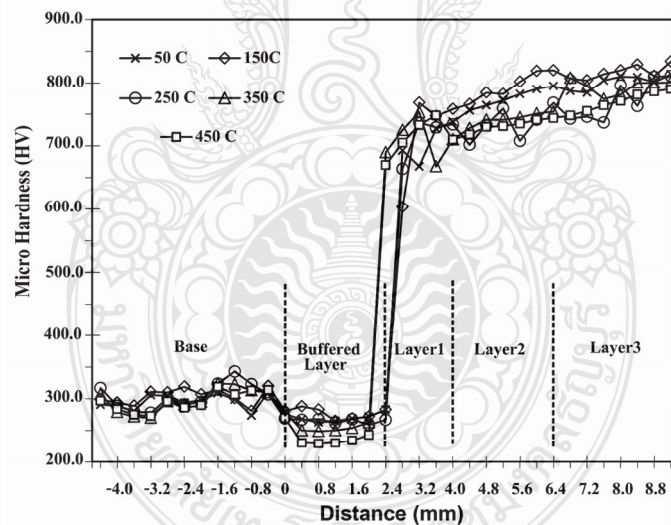
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมเชื่อมกับอัตราการสึกกร่อนการเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้น



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมเชื่อมกับค่าการแอ่นตัวโค้งงอ (Bending)

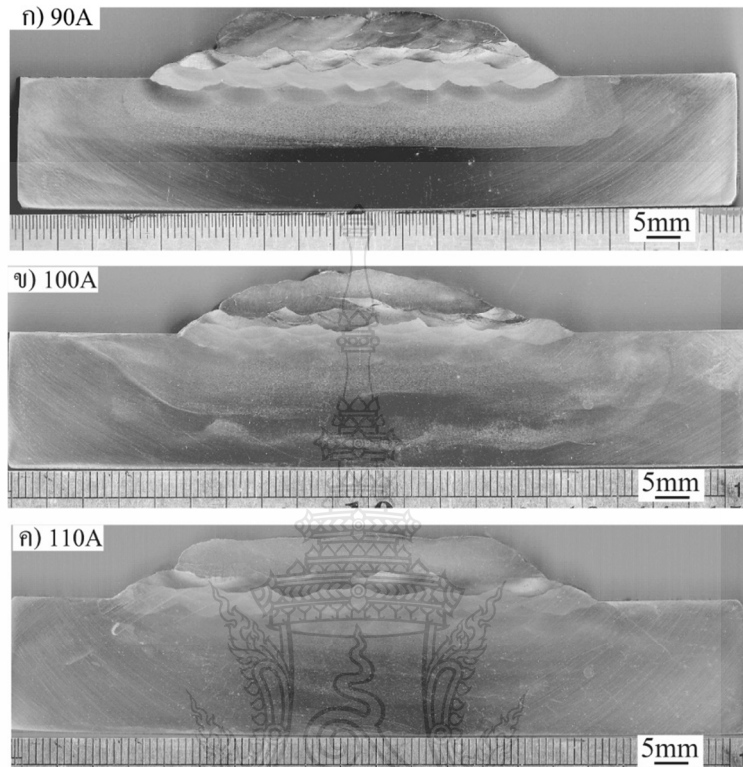
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมเชื่อมกับค่าการแอ่นตัวโค้งงอพบว่า การเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีชั้นรองพื้นที่อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 50-150 °C ที่กระแสเชื่อม 100 A มีค่าการแอ่นตัวโค้งงอ ประมาณ 1 องศา แสดงดังรูปที่ 4.16 (ก) ที่อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม

150 °C ขณะที่ทำการเชื่อมด้วยอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมเพิ่มสูงขึ้นคือ 250-450 °C พบว่าค่าการแอ่นตัวโค้งงอมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นมีค่าประมาณ 2 องศา แสดงดังรูปที่ 4.16 (จ) ที่อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 350 °C อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มีชั้นรองพื้นพบว่าชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีชั้นรองพื้นมีการแอ่นตัวโค้งงอสูงกว่าเมื่อเชื่อมด้วยอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมที่เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของการเชื่อมด้วยอุณหภูมิต่างกันระหว่างที่เชื่อม 50-450 °C ไม่พบจุดบกพร่องเกิดขึ้นบนรอยเชื่อม แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4.16 (ก) และ(ข) รูปที่ 4.17 แสดงค่าความแข็งระหว่างอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 50-450°C กับการเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้นกระแสเชื่อม 100A พบว่า ที่บริเวณ โลหะชิ้นงาน (Base) มีค่าความแข็งประมาณ 250-320 HV และเมื่อทดสอบเข้าไปใกล้บริเวณชั้นรองพื้น (Buffered Layer) พบว่าค่าความมีแนวโน้มลดลงมีค่าความแข็งประมาณ 230-300 HV การที่ค่าความแข็งลดลงบริเวณชั้นรองพื้นอาจเกิดจากส่วนผสมของธาตุในลวดเชื่อมมีปริมาณน้อยกว่าโลหะชิ้นงาน อย่างไรก็ตามเมื่อทดสอบเข้าไปใกล้ชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อทดสอบจนถึงชั้นที่ 2-3 ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามจำนวนชั้นพอกผิวแข็ง



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ค่าความแข็งระหว่างอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 50-450°C กับการเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้นกระแสเชื่อม 100A

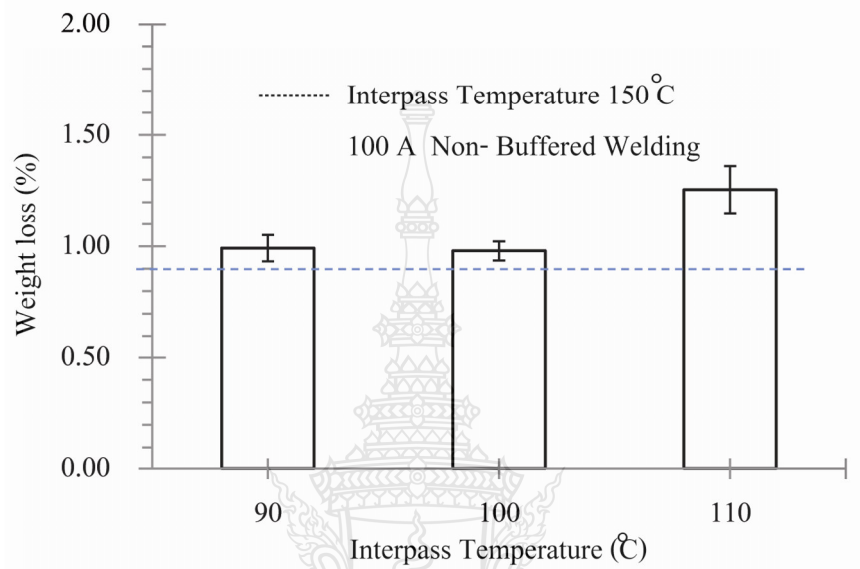
4.5 เปรียบเทียบกระแสเชื่อมต่ออัตรการสึกกร่อนของการเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีชั้นรองพื้น



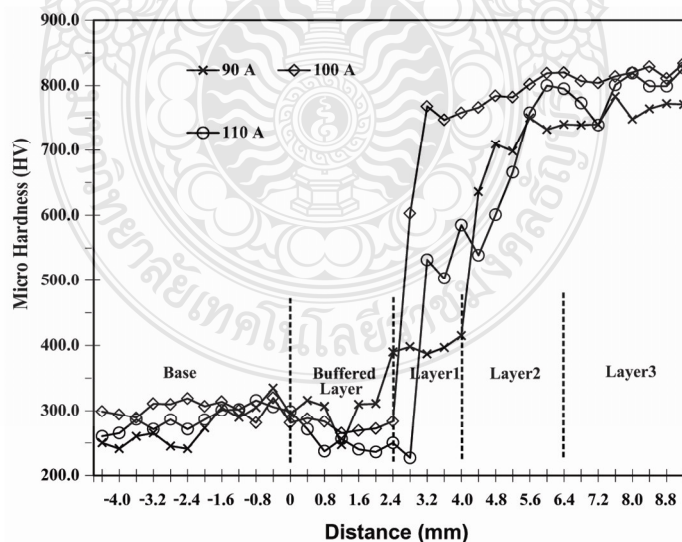
รูปที่ 4.18 โครงสร้างมหภาคที่อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150 °C (ก) กระแสเชื่อม 90 A (ข) กระแสเชื่อม 100 A และ(ค) กระแสเชื่อม 110 A

รูปที่ 4.18 แสดงการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคที่อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150 °C กระแสเชื่อม 90-110 A ไม่พบจุดบกพร่องเกิดขึ้นบนรอยเชื่อมแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4.18 (ก) (ข) และ(ค) และรูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อม 90-110A กับอัตรการสึกกร่อนการเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้น พบว่าการเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้นทั้งสามกระแสมีค่าอัตรการสึกกร่อนสูงกว่าการเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มีชั้นรองพื้น อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบอัตรการสึกกร่อนระหว่างกระแสเชื่อม 90-110 A พบว่า กระแสเชื่อมที่ 90 A ให้ค่าเปอร์เซ็นต์อัตรการสึกกร่อนต่ำ ดีที่สุด โดยมีประมาณ 0.98 % ขณะที่รูป 4.20 แสดงความสัมพันธ์ค่าความแข็งระหว่างกระแสเชื่อม 90-110A กับการเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้นที่อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม 150°C พบว่า ที่บริเวณโลหะชิ้นงานมีค่าความแข็งประมาณ 250-320 HV และเมื่อทดสอบเข้าใกล้บริเวณชั้นรองพื้นพบว่าค่าความมีแนวโน้มลดลงมีค่าความแข็งประมาณ 230-300 HV อย่างไรก็ตาม

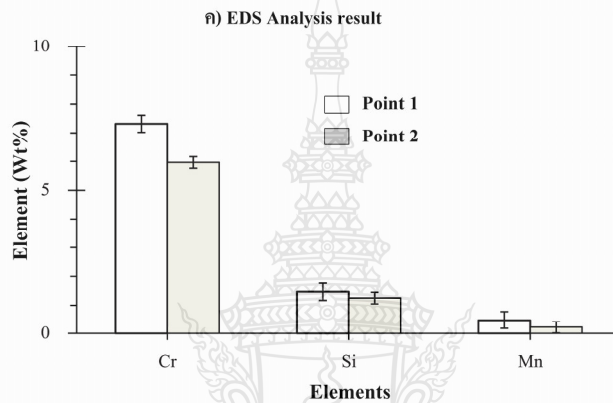
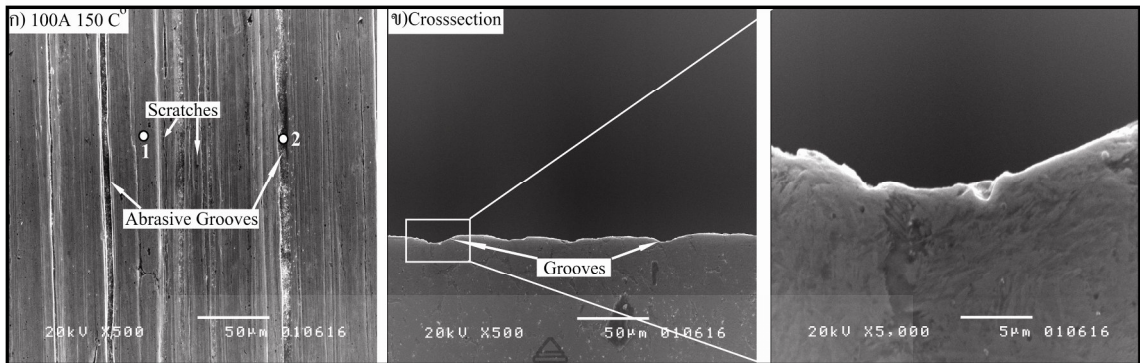
เมื่อกดทดสอบเข้าใกล้ชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทั้ง 3 กระแสเชื่อมและเมื่อกดทดสอบจนถึงชั้นที่ 2-3 ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามจำนวนชั้นพอกผิวแข็ง อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตเปรียบเทียบค่าความแข็งของกระแสเชื่อม 90-110A พบว่า การเชื่อมที่กระแส 100 A .ให้ค่าความแข็งสูงกว่าการเชื่อมด้วยกระแส 90 และ 110A บริเวณโลหะเชื่อมพอกผิวแข็ง



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมกับอัตราการสึกกร่อนการเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้น



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ค่าความแข็งระหว่างกระแสเชื่อม 90-110A กับการเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้นที่ อุณหภูมิระหว่างเทียเชื่อม 150°C



รูปที่ 4.21 ผลการตรวจสอบภาพถ่ายผิวสีกกร่อนและผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน กระแสเชื่อม 100 A อุณหภูมิระหว่างเทียวเชื่อม 150 °C การเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้น

รูปที่ 4.21 แสดงผลการตรวจสอบภาพถ่ายผิวสีกกร่อนและผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน กระแสเชื่อม 100 A อุณหภูมิระหว่างเทียวเชื่อม 150 °C การเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้น พบว่า การเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีชั้นรองพื้นผิวสีกกร่อนเป็นร่องลึกกว้างใหญ่ขึ้นกว่าการเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มีชั้นรองพื้นดังรูปที่ 4.21 (ก) และเมื่อทำการตรวจสอบรอยสีกกร่อนบริเวณหน้าตัดขวางดังรูปที่ 4.21 (ข) พบว่า เกิดร่องเว้าตามรอยสีกกร่อนและได้ทำการขยายตรวจสอบรอยสีกกร่อนบริเวณร่องลึกบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมด้วยกำลังขยาย 5000 เท่า พบว่า ไม่พบการพังทลายแบบเปราะเหมือนกับการเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้นดังรูปที่ 4.21 อย่างไรก็ตามได้ทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานบริเวณรอยสีกกร่อนตำแหน่งที่ 1 ตำแหน่งที่ 2 ดังรูปที่ 4.21 (ก) พบว่า ที่บริเวณผิวสีกกร่อนที่ไม่ปรากฏร่องตำแหน่งทดสอบที่ 1 มีปริมาณธาตุโครเมียม ซิลิกอน และแมงกานีส สูงกว่าบริเวณผิวสีกกร่อนที่เกิดร่องตำแหน่งการทดสอบที่ 2

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ที่เชื่อมด้วยการเชื่อมอาร์กถวดหุ้มฟลักซ์ โดยมีตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วยอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม กระแสเชื่อม และชั้นพอกผิว 3 ชั้น โดยเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้นและเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้น จากนั้นทำการทดสอบสมบัติทางกลของรอยเชื่อม ด้วยวิธีการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน ความแข็งไมโครวิกเกอร์ส บริเวณรอยเชื่อมและศึกษาโครงสร้างมหภาคและจุลภาค บริเวณรอยเชื่อม ผลการทดลองโดยมีสรุปดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 อุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่าความแข็งลดลง

5.1.2 อุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมส่งผลทำให้ค่าความแข็งและค่าความต้านทานการสึกหรอลดลง

5.1.3 เปรียบเทียบความแข็งของชั้นพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้นที่กระแสเชื่อม 100A อุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งสูงสุดคืออุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมที่ 150 °C มีค่าความแข็งของผิวพอกแข็งประมาณ 790HV สูงกว่าลูกโลเลอร์จริงที่มีค่าความแข็ง 650HV

5.1.4 อุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม 150 °C ปริมาณโครเมียมในเนื้อโลหะมีความสม่ำเสมอส่งผลให้ชิ้นงานทดสอบสามารถทนทานการสึกกร่อนได้ดีกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองศึกษาอิทธิพลของจำนวนชั้นการเชื่อมอาร์กถวดหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็งต่อสมบัติของโลหะเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C เกิดปัญหาในระหว่างการทดลองจึงต้องมีการปรับปรุงหรือใช้ในการทดลองในคราวต่อไป โดยมีข้อเสนอแนะในการพิจารณาดังนี้

5.2.1 การทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่อง Dry Sand-Rubber Wheel : DSRW G65 นั้นผิวยางที่ใช้เป็นเวลานานอาจมีการชำรุดส่งผลต่อค่าการทดสอบได้

5.2.2 การควบคุมอุณหภูมิในแต่ละชั้นของการเชื่อมทำได้ยากและทำให้ใช้เวลานานในการเชื่อม

บรรณานุกรม

- [1] K. Yang, Q. Yang, and Y. Bao, "Effect of carbonitride precipitates on the solid/liquid erosion behaviour of hardfacing alloy," *Applied Surface Science*, vol. 284, pp. 540-544, 11/1/ 2013.
- [2] 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, 10/1/ 2012.
- [3] 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// 2005.
- [4] 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, 9/10/ 2007.
- [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, 3/30/ 2006.
- [6] Kobelco welding. [Online]. Available: <http://www.kobewelding.com.sg>,
- [7] H. W. Lee, "Weld metal hydrogen-assisted cracking in thick steel plate weldments," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 445–446, pp. 328-335, 2/15/ 2007.
- [8] J. Onoro, "Weld metal microstructure analysis of 9–12% Cr steels," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 83, pp. 540-545, 7// 2006.
- [9] 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, 6/15/ 2008.
- [10] 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// 2012.
- [11] 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, 11/30/ 2006.

บรรณานุกรม (ต่อ)

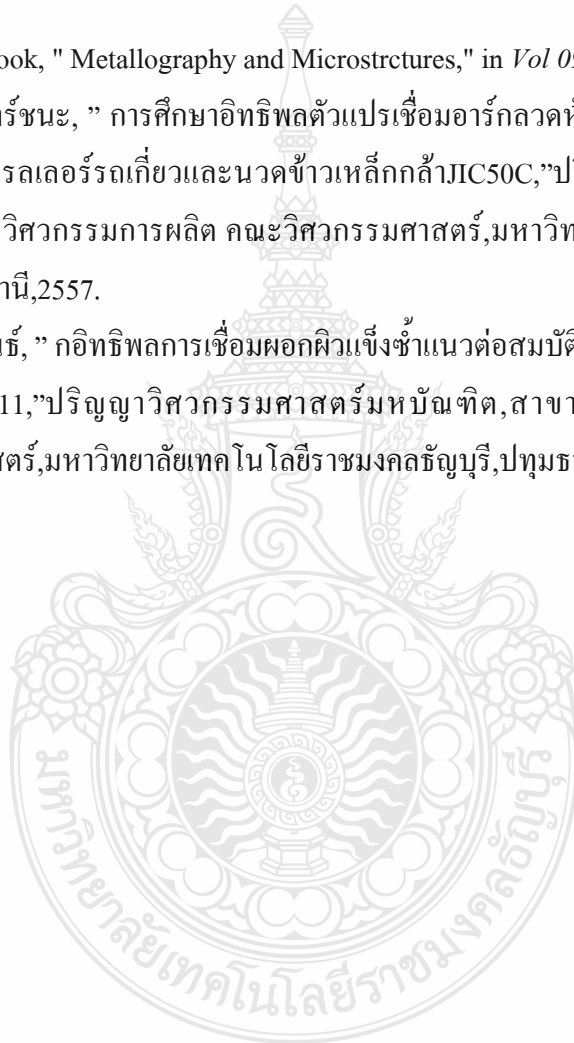
- [12] R. Arabi Jeshvaghani, E. Harati, and M. Shamanian, "Effects of surface alloying on microstructure and wear behavior of ductile iron surface-modified with a nickel-based alloy using shielded metal arc welding," *Materials & Design*, vol. 32, pp. 1531-1536, 3// 2011.
- [13] F. Malek Ghaini, M. Ebrahimnia, 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// 2011.
- [14] 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, 10/16/ 2008.
- [15] E. M. El-Banna, "Effect of preheat on welding of ductile cast iron," *Materials Letters*, vol. 41, pp. 20-26, 10// 1999.
- [16] P. K. Ghosh, P. Yongyuth, P. C. Gupta, A. K. Patwardhan, and S. Prakash, "Two Dimensional Spatial Geometric Solution for Estimating the Macroconstituents Affecting the Mechanical Properties of Multipass C-Mn Steel SAW Deposits," *ISIJ International*, vol. 35, pp. 63-70, 1995.
- [17] Y. L. Y. Y.F. Zhoua, Y.W. Jianga, J. Yanga, X.J. Renb, Q.X. Yanga, "Fe-24 wt.%Cr-4.1 wt.%C hardfacing alloy: Microstructure and carbide refinement mechanisms with ceria additive," *Materials Characterization* vol. 72, pp. 77-86, 2012.
- [18] 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, 2013.
- [19] S. Apay and B. Gulenc, "Wear properties of AISI 1015 steel coated with Stellite 6 by microlaser welding," *Materials & Design*, vol. 55, pp. 1-8, 2014.
- [20] B. R. Kyle Schafer, "Rajiv PithadiaFaculty. Segregation, Banding, and Inclusions in AISI 1050 Carbon Steel," *Materials Processing and Design :MSE*, pp. 430-440, 2010.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [21] Chatterjee, S., & Pal, T. K. (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.
- [22] Japanese Standards Association, JIS Handbook Ferrous Materials&Metallurgy I: JIS G4051 1979. Japan: Japanese Standards Association. pp. 517-523.
- [23] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ประจักษ์ อ่างบุญตา และบุญส่ง จงกลณี. โครงสร้างจุลภาคและสมบัติของรอยเชื่อมวัสดุด้วยเทคโนโลยีการเชื่อมแบบใหม่,สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ 2552
- [24] วิทยา ทองขาว , งานเชื่อมไฟฟ้า,vol. 1 .กรุงเทพฯ:ซีเอ็ดยูเคชั่น,2521
- [25] สมบูรณ์ เต็งหงส์เจริญ ,ลวดเชื่อม
- [26] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ประจักษ์ อ่างบุญตา และบุญส่ง จงกลณี. โครงสร้างจุลภาคและสมบัติของรอยเชื่อมวัสดุด้วยเทคโนโลยีการเชื่อมแบบใหม่,สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ 2552
- [27] ASTM International, G65-94 Standard Test Methods for Measuring Abrasion using the DrySand/Rubber wheel Apparatus 1996
- [28] R. Sekharbabu, H. K. Rafi, and K. P. Rao, "Characterization of D2 tool steel frictionsurfaced
- [29] S. Ritthipakdee, "Abrasive Wear Behavior of Surface Hardfacing on AISI 1020," in National 2. Industrial Engineering Network Conference 2011, Ambassador City Jomtien Hotel, Pattaya Chonburi, Thailand, pp. 2070- 2075
- [30] สุรัถยา ลีมนา, " การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงล้าของผิวพอกเชื่อมของเหล็กกล้าผสมต่ำAISI 340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และ กรรมวิธีการเชื่อมไส้ฟลักซ์,"ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์,มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์,สงขลา,2553.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [31] ชูชาติ คิ้วสงค์, การทดสอบงานเชื่อมแบบทำลายสภาพ, 3 ed. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น) กทม, 2555.
- [32] Focuslab,/Focuslab(online),/2015,Available:www.focuslab.co.th/en/home.php, 10 March 20015
- [33] A. M. Handbook, " Metallography and Microstructures," in *Vol 09* ed, 2004.
- [34] อรรถกร จันทร์ชนะ, " การศึกษาอิทธิพลตัวแปรเชื่อมอาร์กวดหุ้มฟลักซ์ที่มีผลต่อสมบัติผิวพอกแข็งลูกโรลเลอร์รถเกี่ยวและแนวข้อหัวเหล็กกล้าJIC50C,"ปริญาวิทยาศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,สาขาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี,ปทุมธานี,2557.
- [35] คณิต สิทธิพันธ์, " กออิทธิพลการเชื่อมพอกผิวแข็งข้อแนวต่อสมบัติของเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นJIS-SKD11,"ปริญาวิทยาศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,สาขาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี,ปทุมธานี,2557.





ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

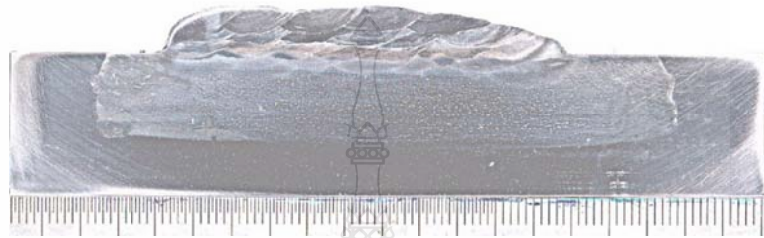
ลักษณะโครงสร้างมหาภาคและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม



ก.1 ลักษณะโครงสร้างมหภาค

รูปที่ ก 1.1 โครงสร้างมหภาคที่อุณหภูมิระหว่างที่เยวเชื่อม 250 °C (ก) กระแสเชื่อม 90 A (ข) กระแสเชื่อม 100 A และ(ข) กระแสเชื่อม 110 Aแบบรองพื้น

(ก).อุณหภูมิระหว่างที่เยวเชื่อม 250 °Cกระแสเชื่อม 100 A แบบรองพื้น



(ข).อุณหภูมิระหว่างที่เยวเชื่อม 350 °Cกระแสเชื่อม 100 A แบบรองพื้น

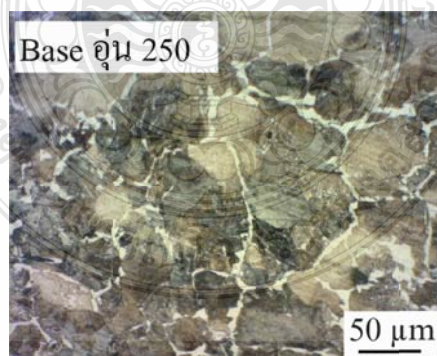
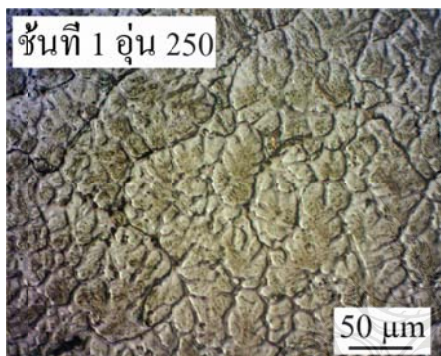
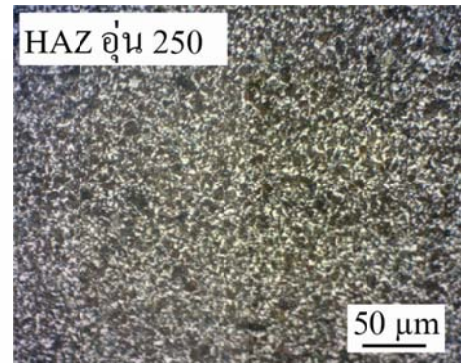
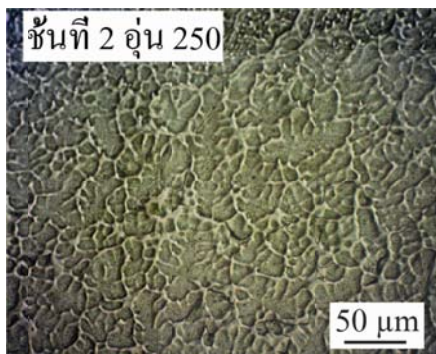


(ข).อุณหภูมิระหว่างที่เยวเชื่อม 450 °Cกระแสเชื่อม 100 A แบบรองพื้น



ก.2 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 1-3ชั้น

รูปที่ ก 2.1 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่อุณหภูมิระหว่างเทีวเชื่อม 250 องศาเซลเซียสเชื่อม 100A แบบไม่รองพื้น





ภาคผนวก ข
มาตรฐานลวดเชื่อม

MG 710

Premium quality alloy for air-hardening tool steels



GENERAL CHARACTERISTICS:

Unique alloy formulation makes this electrode outstanding for the repair of "air" hardening steels. Deposits are highly crack resistant, forgeable and temperable. Unlimited passes in all positions.

APPLICATIONS:

Ideal for repair and build-up of shearing blades, planer plates, anvils, woodworking tools, percussion drills, earth borers, pressure rollers, clamping tools, worm conveyors, mixer arms, rollers, shovel and dredger teeth, crusher jaws and rings. Also for machine parts of steel, cast steel and manganese steel which are subjected to grinding wear combined with strong impact.

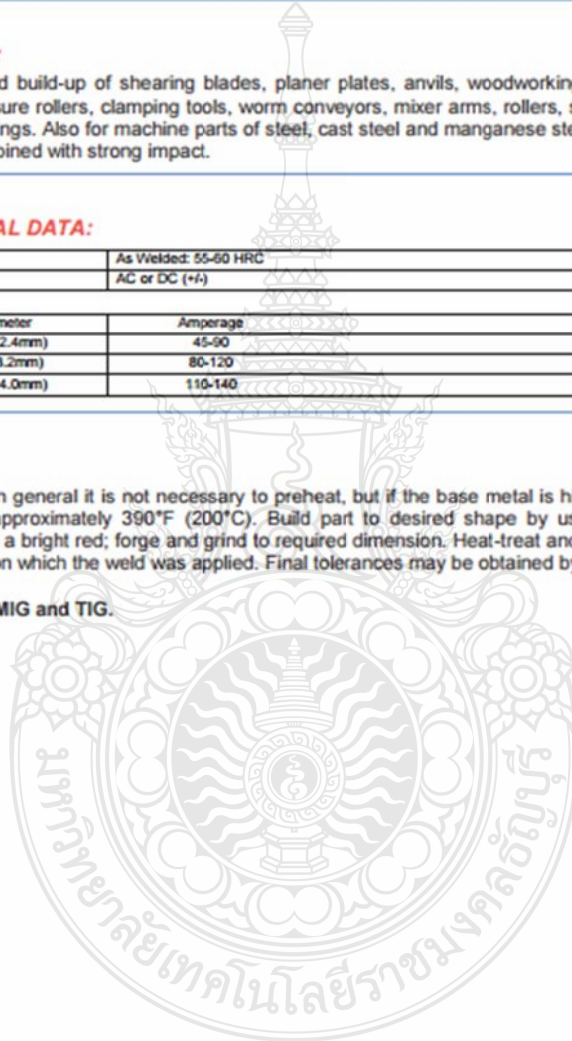
TECHNICAL DATA:

Hardness	As Welded: 55-60 HRC
Polarity	AC or DC (+/-)
Diameter	Amperage
3/32" (2.4mm)	45-90
1/8" (3.2mm)	80-120
5/32" (4.0mm)	110-140

PROCEDURE:

Clean weld area. In general it is not necessary to preheat, but if the base metal is highly carbonized it should be preheated to approximately 390°F (200°C). Build part to desired shape by using as many passes as necessary. Heat to a bright red; forge and grind to required dimension. Heat-treat and harden as you would for the base metal upon which the weld was applied. Final tolerances may be obtained by grinding.

Also available in MIG and TIG.





ภาคผนวก ค

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



เรื่องเต็ม
full paper

การประชุมวิชาการระดับชาติ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

The 12th National Conference

8 - 9 ธันวาคม 2558



ตามรอยพระยุคลบาท เกษตรศาสตร์กำแพงแสน



ผลงานทางวิชาการ 8 สาขา

- ส่งเสริมการเกษตร
- สัตว์และสัตว์แพทย์
- วิศวกรรมศาสตร์
- วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม และความหลากหลายทางชีวภาพ
 - พืชและเทคโนโลยีชีวภาพ
- ศึกษาศาสตร์และพัฒนศาสตร์
- วิทยาศาสตร์สุขภาพและการกีฬา
- มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์



อิทธิพลของอุณหภูมิระหว่างเชื่อมต่อสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า JIS-S50C
Influence of Inter-pass Temperature on JIS-S50C Steel Hard-facing Weld Metal

พรหมโชติ แก้วสี¹, สุวินัย ไสยาเจริญ² และกิตติพงษ์ กิมพงษ์³

Promchot Kaewsee¹, Suvinal Sodajaroen² and Kittipong Kimapong³

บทคัดย่อ

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเป็นเหล็กกล้าที่มีความนิยม ในการใช้เป็นวัสดุดิบ ในการผลิตชิ้นส่วน เครื่องจักรทางการเกษตรเนื่องจากมีสมบัติทางกลดีเยี่ยม อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาผลิตชิ้นส่วนถูกใช้งาน ชิ้นส่วน มักเกิดการเสียหายและพังทลาย หากการเสียหายที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงต่ำ ชิ้นส่วนมักถูกนำมาทำการเชื่อม ซ่อมแซมเพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงได้ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิระหว่างเชื่อมเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ที่เชื่อมด้วยการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยไฟฟ้า ด้วยแปรการเชื่อมในการทดลองนี้ประกอบด้วยอุณหภูมิระหว่าง เชื่อมที่ 150-350°C กระแสเชื่อม 100A จำนวนชั้นพอกแข็ง 3 ชั้น พบว่าการตั้งอุณหภูมิระหว่างเชื่อมเชื่อม ส่งผลต่อการเพิ่มขนาดเกรน ลดค่าความแข็ง และเพิ่มอัตราการสึกกร่อนของโลหะเชื่อม อุณหภูมิระหว่างเชื่อม เชื่อมที่เหมาะสมที่ให้ค่าความแข็ง 1006 HV และอัตราการสึกกร่อนต่ำสุด 2.02 g คือ อุณหภูมิระหว่างเชื่อมที่ 150°C

คำสำคัญ : อุณหภูมิระหว่างเชื่อม, อัตราการสึกกร่อน, เฟอร์ไรต์

Abstract

Medium carbon steel was a base material that often used for producing agricultural machinery parts due to a good mechanical property. However, when the parts were applied, the parts were frequently deteriorated and failed. If some small damage was found, the parts were often welding repaired for a purpose to reuse the parts and affect to decrease the operating cost. Thus, this research aimed to study an influence of interpass temperature on JIS-S50C carbon steel hard-facing weld metal properties. Shielded metal arc welding parameters in this study were an interpass temperature of 150-350°C, a welding current of 100 A, a hard-facing layer of 3 layers. The summarized experimental results showed that increase of pre-heat temperature affected to increase a grain size, decrease the hardness and also increase the wear rate of the hard-facing weld metal. The optimized interpass temperature that produced the weld metal hardness of 1006 HV and minimum wear rate of 2.02 g was the interpass temperature of 150°C.

Keywords: Inter-pass, Wear rate, Shielded metal arc welding

E-mail address: p-kaewsee@hotmail.co.th

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajabhat University of Technology Thanyaburi, Pathumthani 12110

คำนำ

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเป็นเหล็กกล้าที่มีความนิยมในการใช้เป็นวัสดุคืบในการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรทางการเกษตร เช่น ลูกโกลเดอหรือเกี่ยวข้าว เป็นต้น เนื่องจากมีสมบัติทางกลด้านความแข็งแรง ความเหนียว และความแข็งแรงงัดเค้นดีเยี่ยม อย่างไรก็ตามเนื่องนำชิ้นส่วนถูกใช้งานและสัมผัสเสียดสีกับสิ่งแวดล้อม เช่น การสัมผัสกับหินหรือกรวดทราย การสัมผัสกับผิวชิ้นส่วนโลหะอื่นๆ ในเครื่องจักร มักส่งผลทำให้เกิดการเสียหายและพังทลายของชิ้นส่วนขึ้น หากการเสียหายของพื้นผิวชิ้นส่วนที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงต่ำ ชิ้นส่วนดังกล่าวมักถูกนำมาทำการปรับปรุงบริเวณโลหะที่บริเวณการพังทลาย กระบวนการเชื่อมซ่อมด้วยวิธีการเชื่อมพอกแข็งนับเป็นหนึ่งในวิธีการสำคัญที่สามารถซ่อมแซมเมื่อโลหะบริเวณที่เกิดการพังทลาย สามารถเพิ่มสมบัติทางกลแก่ผิวชิ้นส่วนให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงได้ (Yang et al. 2013) การพิจารณาตัวแปรการเชื่อมพอกแข็ง เช่น วิธีการเชื่อม ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม กระแสเชื่อม อุณหภูมิระหว่างเชื่อม หรืออัตราการเข้าหัว เป็นต้น เป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญที่ส่งผลถึงการทำให้เกิดแนวเชื่อมพอกแข็งที่มีสมบัติดังต้องการและปราศจากรอยแตกวิาว หรือจุดบกพร่องใดๆ (H-Hong et al. 2008) ด้วยเหตุนี้การศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติของโลหะเชื่อมจึงมีการศึกษาและพัฒนาเพื่อให้มีความเหมาะสมต่อลักษณะงานตลอดเวลา

ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ทำการศึกษากการเชื่อมพอกผิวแข็งบนโลหะเหล็กที่มีรูปแบบการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมและอุณหภูมิระหว่างเชื่อมที่นำสนธิและคาดว่าสามารถประยุกต์ใช้ในการพัฒนาสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางให้มีค่าที่ที่เหมาะสมในการใช้งานต่างๆ และปราศจากการเกิดการแตกวิาว หรือความเปราะ ในโครงสร้างจุลภาค ตัวอย่างการศึกษาและพัฒนาสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็ง เช่น การเชื่อมพอกแข็งจำนวน 3 ชั้นด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ 3 ชนิดบนพื้นผิวเหล็กกล้า ASTM A36 ที่พบว่าโลหะเชื่อมพอกแข็งมีความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสังกะสีบนโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้นและมีการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมเสมอ (Buchery et al. 2006) ในการเชื่อมเหล็กต่อเตาที่มีการอุ่นงานและอุณหภูมิระหว่างเชื่อมเชื่อมของการเชื่อมพอกแข็งให้มีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 200°C ด้วยลวดเชื่อม 2 ชนิดที่มีส่วนผสมของเหล็กกล้าผสม Fe-Cr-C และทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคแบบไฮโปและไฮโปยูเทคติกในโลหะพอกแข็ง ลวดเชื่อมไฮโปยูเทคติกให้ความต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าลวดเชื่อมไฮโปยูเทคติก ค่าความแข็งที่เหมาะสมที่สุดพบได้กับการเชื่อมในชั้นเชื่อมชั้นแรก พฤติกรรมการสึกหรอนั้นไม่มีความแตกต่างกันในทุกๆ สภาวะ และไม่เกิดการแตกวิาวในชิ้นงาน อย่างไรก็ตามเนื่องทำการทดสอบการสึกหรอพบว่ากลไกการเกิดการสึกหรอเกิดจากหลุดลอกเป็นชิ้นๆ ของโครงสร้างและการแตกวิาวของผิวงาน เนื่องจากความเปราะของโลหะเชื่อมพอกแข็ง (Buchanan et al. 2007) นอกจากนี้ในการเชื่อมพอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กหล่อสีเทาที่มีปริมาณคาร์บอนสูง เช่น เหล็กหล่อสีเทา (ASTM2500) ต้องมีการรักษาอุณหภูมิระหว่างเชื่อมเชื่อมมีค่าไม่ต่ำกว่า 400°C เพื่อทำให้ยัตการเกิดการสึกหรอลดลง พบว่าอัตราการสึกหรอขึ้นกับสัดส่วนของคาร์บอนในผิวพอกแข็งและความแข็งไม่ได้เป็นปัจจัยหลักในการเพิ่มอัตราการสึกหรอของผิวพอกแข็งแต่ขึ้นกับอัตราการกระจายตัวของเฟสคาร์ไบด์ (Chatterjee and Pal 2006)

ด้วยเหตุผลในการหลีกเลี่ยงการเกิดการแตกวิาวในโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกแข็งโลหะที่มีปริมาณคาร์บอนสูง และเพิ่มสมบัติทางกลของโลหะเชื่อมพอกแข็ง งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ในการศึกษา

วิธีการเชื่อมพรมระหว่างเที่ยวเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ที่เชื่อมด้วยการเชื่อมอาร์กอลูมิเนียมฟลักซ์ ผลการทดลองที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาการเชื่อมโลหะพอกแข็งชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและการซ่อมบำรุงในงานอุตสาหกรรมเกษตรต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ชิ้นตอนการเชื่อม

วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง JIS-S50C ที่มีส่วนผสมทางเคมีดัง Table 1 แผ่นเหล็กกล้าแผ่นรีดคดเชื่อมด้วยวิธีทางกลให้มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าความกว้าง 100 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร และความหนา 20 มิลลิเมตร ผิวด้านบนของแผ่นเหล็กถูกทำการเจียรระในผิวหน้าเพื่อกำจัดผิวตึงจากการรีดคดและปรับผิวให้มีความราบเรียบก่อนทำการเชื่อม กระบวนการเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อม คือ การเชื่อมอาร์กอลูมิเนียมฟลักซ์ (Shielded metal arc welding: SMAW) โดยช่างเชื่อมที่ผ่านการรับรองมาตรฐานจากกรมพัฒนาฝีมือแรงงาน กระทรวงแรงงาน ลวดเชื่อมฟลักซ์ที่ใช้เชื่อม คือ ลวดเชื่อมไฟฟลักซ์ MG 710 (Flux-cored wire arc Welding) ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดัง Table 1 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร

Table 1 Chemical Composition of Material and electrodes.

Material	Chemical composition (%)				
Type	Standard	C	Si	Mn	Cr
Medium carbon steel	JIS S50C	0.52	0.26	0.78	0.19
Hard facing electrodes	MG 710	4.0	1.2	2	8.5

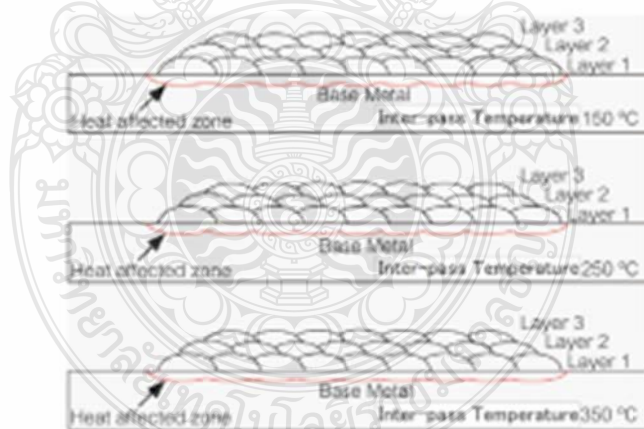


Figure 1 Hardfacing layer was welded.

ตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วย การเชื่อมในท่าราบ (Flat Position) ไม่มีการสร้างร่องพื้น กระแสเชื่อม 100 A อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงาน (Pre-heat temperature) คือ 150°C – 350°C อุณหภูมิระหว่างเที่ยวเชื่อม คือ 150°C – 350°C การรักษาอุณหภูมิอุ่นชิ้นงานและอุณหภูมิระหว่างเที่ยวเชื่อมทำได้โดยการใช้แผ่นให้ความร้อน

การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 12

(Hot plate) และมีการตรวจสอบอุณหภูมิให้คงที่ตามกำหนดด้วยการวัดโดยการใส่เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค เมื่ออุณหภูมิการขึ้นงานได้ตามกำหนดจึงทำการเชื่อมชิ้นงานในแนวที่หนึ่ง เมื่อเสร็จสิ้นในแนวที่หนึ่ง ชิ้นงานถูกปล่อยให้อุณหภูมิลดลงมากที่อุณหภูมิขึ้นงานที่กำหนดก่อนทำการเชื่อมในแนวถัดไปจนครบ 3 ชั้นพอกแห้ง แนวเชื่อมพอกผิวแข็งทั้งหมดมีขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน JIS Z3114 ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางแนวเชื่อมเฉลี่ย 10 มิลลิเมตร หลังจากทำการเชื่อมเสร็จจนครบ 3 ชั้นพอกแห้งแล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำชิ้นงานไปทำการทดสอบสมบัติทางกลและตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบอัตราการสึกกร่อนเชื่อมครั้งนี้เป็นการทดสอบแบบแห้ง (Dry Sand Rubber Wheel :DSRW) ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM G65 ทรายที่ใช้ในการทดสอบเป็นทรายแก้วทำการอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อจัดความชื้นภายในทราย จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในอุณหภูมิห้อง แล้วจึงทำการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 50 ไมครอน การทดสอบการสึกกร่อนครั้งนี้ ใช้อัตราการไหลของทราย 300-400 กรัมต่อนาที ระยะการทดสอบ 4309 เมตร น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ 130 นิวตัน ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ลักษณะเครื่องทดสอบการสึกกร่อนแสดงดัง Figure 2



Figure 2 Dry sand-rubber wheel testing machine.

การทดสอบความแข็งของโลหะเชื่อมใช้การทดสอบความแข็งจุดภาคแบบไมโครวิกเกอร์ส (Micro Vickers Hardness) โดยทำการทดสอบเป็นเส้นตรงผ่านผิวชิ้นแนวเชื่อมชั้นที่ 1 ถึง ชั้นที่ 3 โดยระยะห่างระหว่างจุดทดสอบ 1 มิลลิเมตร แรงที่ใช้ในการทดสอบ 100 กรัม และเวลาในการกดแม่ 10 วินาที แสดงดัง Figure 3 (A)

การเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างขนาดและโครงสร้างจุลภาคทำได้โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเรียบร้อยแล้วทำการตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานทดสอบที่มีระบบหมุนเวียนน้ำหล่อเย็น ชิ้นงานที่ได้ถูกนำมากำกับการกัดด้วยกระดาษทราย เบอร์ 240-1200 ตามลำดับ และทำการจุ่มในถ้วยผงเพชรขนาด 1 ไมครอนจนผิวมันวาว ผิวสัมผัสถูกทำการกัดกรด (Etching) ผิวหน้าชิ้นงานเชื่อม ด้วยสารละลายที่มีส่วนผสมประกอบด้วยกรดไนตริก 10 มิลลิลิตร และกรดไฮโดรคลอริก 30 มิลลิลิตร ให้ความเวลาในการกัดกรดประมาณ 60 วินาที ตาม

มาตรฐาน ASTM E407 จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง มีชื่อ OLYMPUS BX51M บริเวณที่กำหนด คือ บริเวณโลหะฐาน (Base Metal) บริเวณกระทบบริเวณ (Heat-affected zone) และบริเวณชั้นแนวเชื่อม (Weld Metal Layer) ชั้นที่ 1-3 แสดงดัง Figure 3 (B)

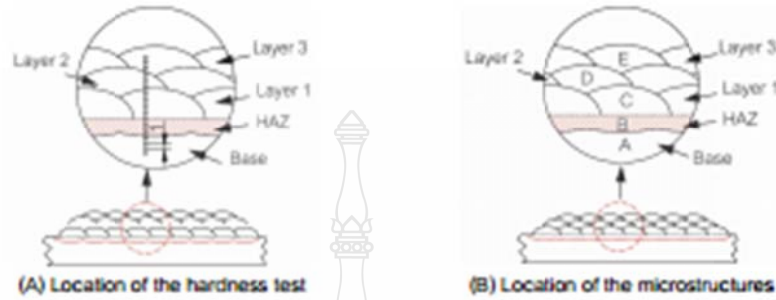


Figure 3 Location test of hardfaced welded.

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างหน้าตัด

Figure 4 แสดงภาคตัดตั้งฉากกับทิศทางของแนวการเชื่อมพอกผิว โดยตัวแปรการเชื่อมดังกล่าวกำหนดไว้ในหัวข้ออุปกรณ์และวิธีการ ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่าผิวหน้าของเชื่อม (Weld face) มีความสม่ำเสมอ โครงสร้างหน้าภาคมีความสมบูรณ์และไม่พบจุดบกพร่องชนิดรู (Void) ภายในรอยเชื่อมที่เกิดจากการหลอมละลายไม่สมบูรณ์



Figure 4 Macrostructure of hardfaced welded.

3.2 ผลการทดสอบอัตราค่าการสึกหรอ

Figure 5 แสดงผลการทดสอบอัตราค่าการสึกหรอของรอยเชื่อมที่อุณหภูมิการอุ่นร้อนก่อนการเชื่อมแตกต่างกัน บนเหล็กกล้า JIS S50C ซึ่งพบว่าอุณหภูมิระหว่างเพื่อเชื่อมร้อนก่อนให้ความสัมพันธ์กับอัตราค่าการสึกหรอของผิวรอยเชื่อม ซึ่งรอยเชื่อมที่มีอัตราค่าการสึกหรอค่าที่รอยเชื่อมที่อุ่นร้อนก่อนที่อุณหภูมิ 150°C แสดงค่าอัตราค่าการสึกหรอค่าที่ 2.02 กรัม และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิระหว่างเพื่อเชื่อมร้อนก่อนเชื่อม 250°C และ 350°C พบว่าอัตราค่าการสึกหรอแนวโน้มสูงขึ้น แสดงค่าอัตราค่าการสึกหรอที่ 2.2 กรัม และ 2.5 กรัม ตามลำดับ จึงอาจกล่าวได้ว่าการตั้งขึ้นของอัตราค่าการสึกหรอของพื้นผิวแนวเชื่อมเป็นผลมาจากการลดลงของความแข็งแรงของเนื้อโลหะเชื่อม การเชื่อมพอกผิวแข็ง ดัง Figure 5

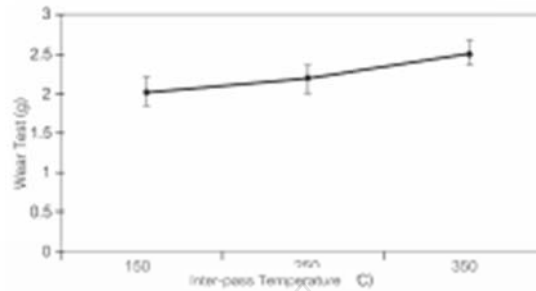


Figure 5 Wear rate of hardfaced Inter-pass temperature 150°C-350°C.

3.3 ผลการทดสอบความแข็ง

Figure 6 แสดงผลการทดสอบค่าความแข็งของเชื่อมทำการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยลวดเชื่อม MG 710 เปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างเชื่อมที่ 150°C, 250°C และ 350°C ซึ่งพบว่าอุณหภูมิที่ 150°C ให้ค่าความแข็ง สูงสุด ที่เนื้อโลหะเชื่อมชั้นที่ 3 อุณหภูมิระหว่างเชื่อมที่ 150°C บริเวณโลหะขึ้นงาน และบริเวณกระทบโซน ระยะตำแหน่งกคทดสอบที่ -18 ถึง 0 มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 290 - 320 HV และเนื้อเชื่อมชั้นที่เนื้อโลหะเชื่อมชั้นที่ 1 ระยะตำแหน่งกคทดสอบที่ 1 ถึง 13 มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 710 - 810 HV และมีแนวโน้มสูงขึ้นไปเนื้อโลหะเชื่อมชั้นที่ 2 ระยะตำแหน่งกคทดสอบที่ 14 ถึง 26 มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 850 - 863 HV และเนื้อโลหะเชื่อมชั้นที่ 3 ให้ค่าความแข็งสูงระยะตำแหน่งกคทดสอบที่ 27 ถึง 38 มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 920 - 1005 HV ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S.Chomjee and T.K.Pai ได้รายงานไว้ว่าจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นของการเชื่อมพอกผิวแข็งส่งผลให้ค่าความแข็งนั้นเพิ่มขึ้นตาม ในการเชื่อมเหล็กหล่อ สีเทา (ASTM grade 2500) จำนวนโลหะเชื่อม 3 ชั้น (Chomjee, S. and Pal, T.K.,2006) และเนื้อเชื่อมอุณหภูมิเชื่อมขึ้นงาน ที่ 250°C พบว่าค่าความแข็งนั้นต่ำกว่าทุกชั้นแนวเชื่อม แสดงดัง Figure 6 เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิระหว่างเชื่อมขึ้นงาน ที่ 150°C และที่อุณหภูมิ ที่ 350°C แสดงของค่าความแข็งต่ำสุด ที่บริเวณโลหะขึ้นงาน และบริเวณกระทบโซน ระยะตำแหน่งกคทดสอบที่ -18 ถึง 0 มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 233 - 240 HV และค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกระดับชั้นของเนื้อโลหะเชื่อม ที่เนื้อโลหะเชื่อมชั้นที่ 1 ระยะตำแหน่งกคทดสอบที่ 1 ถึง 13 มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 297 - 340 HV และค่าความแข็งมีแนวโน้มสูงขึ้นไปเนื้อโลหะเชื่อมชั้นที่ 2 ระยะตำแหน่งกคทดสอบที่ 14 ถึง 26 มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 410 - 530 HV และเนื้อโลหะเชื่อมชั้นที่ 3 ระยะตำแหน่งกคทดสอบที่ 27 ถึง 38 มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 670 - 870 HV ดังกล่าวนี้ จึงอาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มของค่าความแข็งของพื้นผิวโลหะเชื่อมส่งผลต่อการลดของอัตราการสึกกร่อนของพื้นผิวโลหะเชื่อม ดัง Figure 6 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อุทัยภักดี (2554) ทำการวิจัย เรื่องพฤติกรรมการสึกกร่อนแบบรีดสีของผิวเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็ก AISI 1020^o ซึ่งได้รายงานไว้ว่าการเพิ่มของจำนวนชั้น การพอกผิวแข็งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งโลหะเชื่อมและลดของอัตราการสึกกร่อนของพื้นผิว โลหะเชื่อมได้ (อุทัยภักดี 2554)

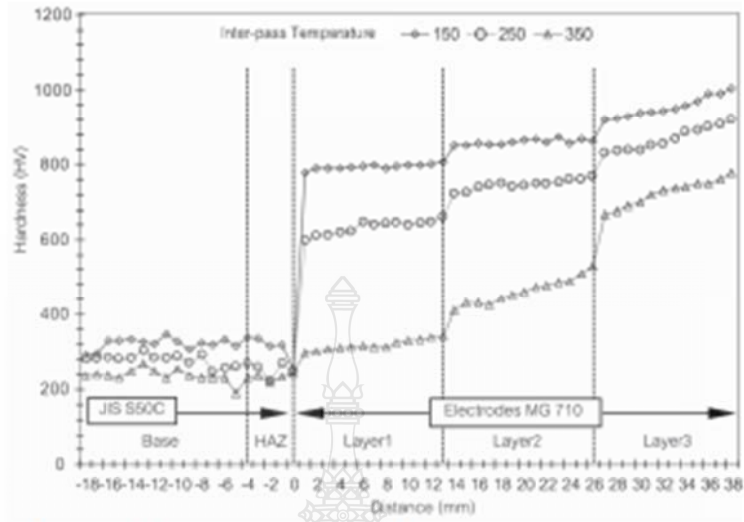


Figure 6 hardness distribution along the hardfaced welded.

3.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

Figure 7 แสดงโครงสร้างชิ้นงานเชื่อมพลาสมาซึ่ง อุณหภูมิระหว่างเชื่อมเชื่อม 150°C เชื่อมด้วยลวดเชื่อม MG 710 ซึ่งแสดงค่าความแข็งสูงและค่าอัตราการสึกกร่อนต่ำสุด ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานทดสอบแสดงดัง Figure 7(A) พบว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเชื่อม เกิดโครงสร้างเกรนมีลักษณะมีสีขาว และสีเข้ม ซึ่งคาดว่าเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ (สีขาว) และเฟสซีเมนไทต์ (สีเข้ม) ดัง Figure 7 (B) ซึ่งพบว่าในพื้นที่กระทบของโลหะเชื่อม พบเฟสเฟอร์ไรต์ และเฟสซีเมนไทต์ ที่มีขนาดเล็กลง ซึ่ง Kyle et al (2010) ได้รายงานไว้ว่า ความร้อนจากการเชื่อมส่งผลให้ขนาดและรูปร่างของเฟสเฟอร์ไรต์และซีเมนไทต์ บริเวณพื้นที่กระทบมีขนาดเล็กและกระจายตัวทั่วทั้งพื้นที่กระทบ (Kyle et al., 2010) ดัง Figure 7 (B) บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld) ชั้นที่ 1 Figure 7 (C) ตรวจสอบปรากฏโครงสร้างแบบเบนไดรด์ บริเวณขอบเกรนปรากฏเฟสโคโรเนียมคาร์ไบด์ (ลูกศรชี้) มีลักษณะคล้ายกิ่งก้านของต้นไม้ (วิลสัน นูตติงสกล , 2548) ลักษณะการกระจายตัวของเกรนไม่สม่ำเสมอ Figure 7 (D) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมชั้นที่ 2 ลักษณะเกรนที่ลักษณะมียาว ปรากฏเฟสโคโรเนียมคาร์ไบด์ กระจายในโครงสร้าง (สุพร อุทธิภักดี, 2554) Figure 7 (E) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อ เชื่อมชั้นที่ 3 ลักษณะเกรนมีขนาดเล็ก กกลม บริเวณขอบเกรนปรากฏเฟสโคโรเนียมคาร์ไบด์สีขาว (ลูกศรชี้) มีขนาดเล็กและยาวแทรกอยู่ตามขอบเกรน (สุรจรงค์นา สี , 2555)

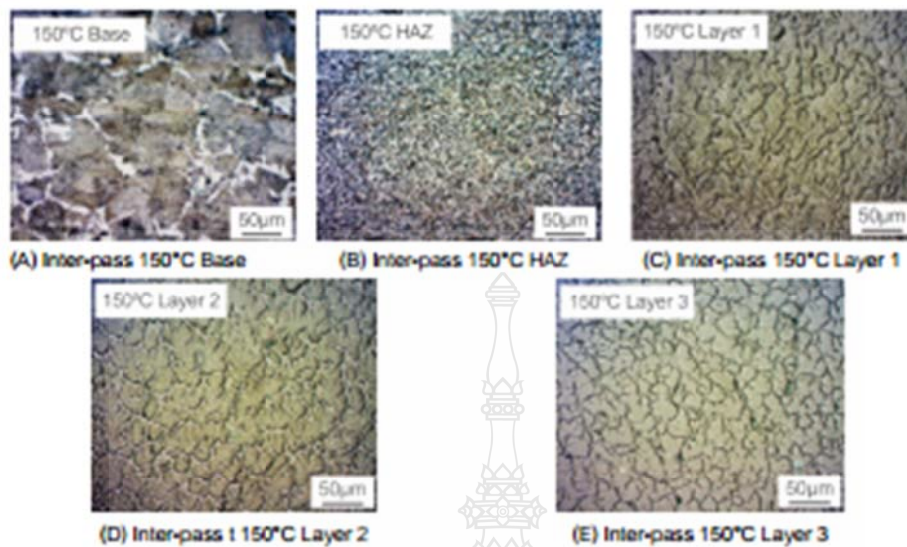


Figure 7 Microstructures 3 hard-faced welded layers with inter-pass temperature 150°C

Figure 8 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมชั้นที่ 3 จุดอุณหภูมิการระหว่างเชื่อมเชื่อม
 ชิ้นงาน 150°C - 350°C ซึ่งพบว่าลักษณะเกรนของโลหะเชื่อมมีลักษณะแตกต่างกัน ชิ้นงานที่ทำการอุ่นด้วย
 จุดอุณหภูมิ 150°C พบลักษณะเกรนขนาดเล็กและปรากฏเฟสโครเมียมคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรน (สุรธังคณา ส .
 2555) กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดัง Figure 8(A) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิระหว่างเชื่อมเชื่อมใน พบว่าขนาดของเกรน
 ภายในโลหะเชื่อมมีขนาดใหญ่มากขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิ 350°C เมื่อทำการวัดขนาดเกรน ของโลหะเชื่อม ด้วยโปรแกรม
 Image J พบว่าที่อุณหภูมิ 150°C ขนาดของเกรน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 22.7 µm Figure 9 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น
 เมื่ออุณหภูมิการเชื่อมมีขึ้นจากเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 33.58 µm และ 51.66 µm ตามลำดับ Figure 9
 ความถี่ของบริเวณแนวเชื่อมสูงทำให้อัตราการเย็นตัวเร็ว (Gharibshahiyan, 2011)

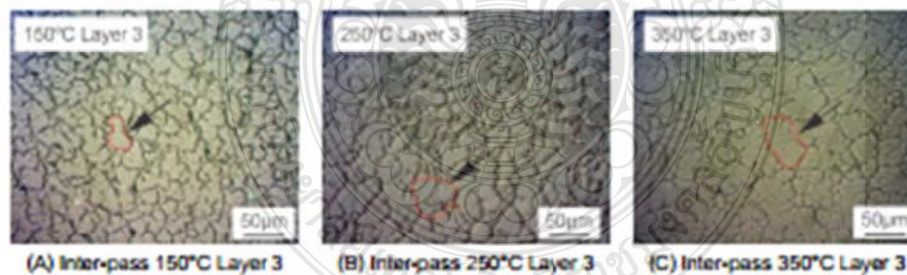


Figure 8 Microstructures hard-faced welded layer 3 with Pre-heat temperature 150°C - 350°C

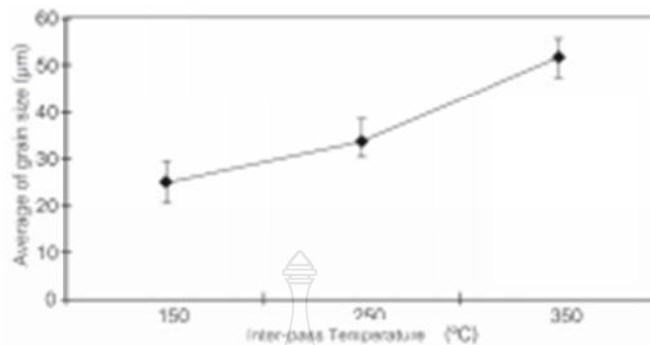


Figure 9 Average grain size of Inter-pass temperature of welded layer 3

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลการให้ความร้อนขณะเชื่อมต่อความเค้นตกค้างในชั้นพอกผิวแข็งเหล็กกล้า JIS S50C การเชื่อมอาร์กสวดไส้ฟลักซ์ ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การให้ความร้อนขณะเชื่อมมีผลต่อค่าความแข็งชิ้นงานเชื่อม อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมชิ้นงานที่ 150°C ให้ค่าความแข็งสูงสุด และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมส่งผลให้ค่าความแข็งชิ้นงานเชื่อมลดลง
2. จำนวนชั้นโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งที่เพิ่มชิ้นส่งผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งสูงสุดของโลหะเชื่อม คือผิวหน้าของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็ง ชั้นที่ 3 และโลหะฐานแสดงค่าความแข็งต่ำสุด
3. เฟสที่มีความแข็งสูงคือเฟสที่มีขนาดเกรนเล็กและมีเกรนกระจายตัว อย่างสม่ำเสมอ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณ วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมืออุปกรณ์และอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ฤทธิศักดิ์, ส. (2554). พฤติกรรมการสึกหรอบนวัสดุสังเคราะห์เชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็ก AISI 1020 Abrasive Wear Behavior of Surface Hardfacing on AISI 1020. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554 : 2070-2075

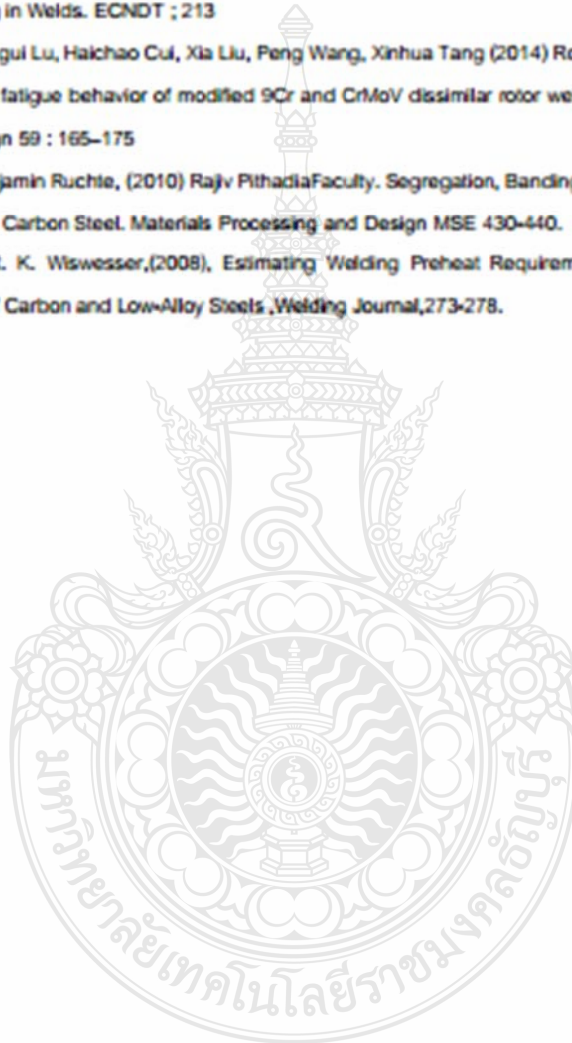
สุรชังคณา ส. ไชยกุล วิเชียรนาโชติ.(2555) การเปรียบเทียบความแข็งแรงของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางระหว่างการอบชุบและการเชื่อมพอกผิวสำหรับงานด้านทานการเสียดสี วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

วิลาสินี วุฒิเดิรสกถ. อุมวรินทร์ ทองศรีโสมิกานันท์ และอนาภรณ์ ไกรชาญ์ (2548). การศึกษาและวิเคราะห์โลหะจากภาพ. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). พิมพ์ครั้งที่ 1 บริษัทไทยเซฟเฟค สตีลโอ.

Buchely, M.F., Gutierrez, J.C., Leon, L.M., Toro, A. (2008).The Effect of Microstructure on Abrasive Wore of Hardfacing Alloy. Wore 259 : 52-61.

การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ครั้งที่ 12

- Buchanan, V. E., P. H. Shipway, et al. (2007). Microstructure and abrasive wear behavior of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry. *Wear* 263(1-6): 99-110.
- 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.
- Milos JOVANOVIC, Gabriel RIHAR.(2006) Analysis of Ultrasonic Indications in Lack of Fusion Occurring in Welds. *ECNDT* ; 213
- Qingjun Wu, Fenggui Lu, Haichao Cui, Xia Liu, Peng Wang, Xinhua Tang (2014) Role of butter layer in low-cycle fatigue behavior of modified 9Cr and CrMoV dissimilar rotor welded joint *Materials and Design* 59 : 165-175
- Kyle Schafer, Benjamin Ruchte, (2010) Rajiv PithadiaFaculty. Segregation, Banding, and Inclusions in AISI 1050 Carbon Steel. *Materials Processing and Design MSE* 430-440.
- R. W. Hinton , R. K. Wiswesser,(2008), Estimating Welding Preheat Requirements for Unknown Grades of Carbon and Low-Alloy Steels ,*Welding Journal*,273-278.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล . พรหมโชติ แก้วสี
วัน เดือน ปีเกิด 21 มกราคม 2524
ที่อยู่ 49/1 หมู่6 ตำบลบางหลวง อำเภอเมืองปทุมธานี
จังหวัดปทุมธานี 1200
การศึกษา ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยปทุมธานี
ประสบการณ์การทำงาน วิศวกรทดสอบ บริษัท เอ เอ อิเล็กทริไล ตั้งแต่ พ.ศ.2559
ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์ 0914359133
อีเมล p-kaewsee@hotmail.co.th

