



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษากรรมวิธีเชื่อมพอกแข็งที่เหมาะสมเพื่อ
ป้องกันการสึกหรอและยืดอายุการใช้งาน
สำหรับฟันไม้เหล็กกล้าแมงกานีส

ผู้วิจัย ผศ.ดร. ประภาศ เมืองจันทร์บุรี
นายชินนทร์ ดำรัสการ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากเงินรายได้
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบวิธีการเชื่อมพอกแข็งที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการสึกหรอและยืดอายุการใช้งานสำหรับพินโมเหล็กกล้าแมงกานีส โดยใช้กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ โดยศึกษาระบบวิธีการเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าแมงกานีส ของพินโมเครื่องมือถ่านหิน ที่ศึกษาการเชื่อมพอกแข็งในสภาวะการเชื่อมในบรรยากาศปกติและเชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิ โดยหลังการเชื่อมจะศึกษาทั้งแบบทำและไม่ทำการตีกระแทกเพิ่มความแข็ง โดยการวิเคราะห์หลักได้แก่ โครงสร้างมหภาค/จุลภาค การทดสอบความแข็งและทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานเชื่อมแบบต่างๆ เช่น การเชื่อมรองพิน การเชื่อมสร้างเนื้อและการเชื่อมพอกผิวแข็ง

การเชื่อมเหล็กกล้าแมงกานีส ลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนิติกจะถูกนำมาใช้เป็นชั้นรองพิน ลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าโครเมียม-แมงกานีสออสเทนิติกถูกนำมาใช้เป็นชั้นสร้างเนื้อ และลวดเชื่อมชนิดมาร์เทนซิติคถูกนำมาใช้เป็นชั้นพอกแข็ง โดยมีการเชื่อมทั้งหมด 12 เงื่อนไข จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ชิ้นงานที่เชื่อมสร้างเนื้อ 1 และ 2 ชั้น หลังการตีกระแทก พบว่าในชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศมีรอยแตกในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมากกว่าชิ้นงานที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ อย่างไรก็ตามในชิ้นงานที่เชื่อมสร้างเนื้อ 3 ชั้น หลังการตีกระแทกพบรอยแตกในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนเฉพาะในชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศเท่านั้น สำหรับการทดสอบการสึกหรอ กรณีเชื่อมรองพิน 1 ชั้น สร้างเนื้อ 3 ชั้น และพอกแข็ง 2 ชั้นที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ ให้ค่าการสูญเสียเนื้อโลหะต่ำที่สุด จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ส่วนหน้าพินโมที่ได้รับแรงกระแทกควรซ่อมด้วยลวดเชื่อมสร้างเนื้อ ส่วนด้านบน ด้านข้าง และร่องระหว่างพินโมควรซ่อมด้วย เชื่อมรองพิน 1 ชั้น สร้างเนื้อ 3 ชั้น และพอกแข็ง 2 ชั้น โดยการเชื่อมควรมีการควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงาน เพื่อลดการแตกที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน

Abstract

This research is a study of investigation of proper welding hardfacing for wear protection and life extending of Mn steel coal crusher using shielded metal arc welding (SMAW) process. The manganese steel for double roll crusher, welding hardfacing in normal atmosphere and controlled atmosphere were studied. In addition, hardfaced sample before and after work hardening was also investigated by macro/micro structure, hardness test and abrasive wear resistance test. The samples were hardfaced by varies condition such as buffer layer, build up layer and hardfacing layer.

For High manganese steel welding procedure, austenitic stainless steel, austenitic manganese-chromium and martensitic hardfacing electrodes were selected as buffer, build-up and hardfacing, respectively. Twelve types of welding procedures were investigated. Results obtained after work hardening showed that, samples with 1 and 2 build-up layers, samples welded in air revealed more crack in the heat affected zone (HAZ) compared with sample welded in controlled atmosphere. However, samples with 3 build-up layers indicated cracks (after work hardening) only samples welded in air. No crack observed in the HAZ of samples welded in controlled atmosphere. For abrasive wear resistant test, sample with buffer, 3 layers build-up and 2 layers hardfacing (welded in controlled atmosphere) showed lowest weight loss. The advice procedure is welding by controlled atmosphere in order to reduce cracks in HAZ after work hardening. Recommended welding repair for front area of the crusher is with Austenitic manganese chromium electrode. For other areas should be welded with 1 buffer layer, 3 build-up layers and 2 hardfacing layers with controlled atmosphere.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์เป็นอย่างสูงที่
ให้ทุนการทำวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุที่อนุเคราะห์ให้ใช้
เครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ในการวิจัย รวมถึงสนับสนุนส่งเสริมให้บุคลากรของภาควิชาได้ทำการ
วิจัยครั้งนี้

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ให้ข้อมูล
รายละเอียดทางเทคนิค ตลอดจนคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างมากในงานวิจัยนี้

คำนำ

รายงานเล่มนี้เป็นการสรุปการทำวิจัยเรื่อง “การศึกษากรรมวิธีเชื่อมพอกแข็งที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการสึกหรอและยืดอายุการใช้งานสำหรับฟันโม่เหล็กกล้าแมงกานีส” โดยผู้วิจัย ผศ.ดร. ประภาศ เมืองจันทร์บุรี และคณะ งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2556 สำหรับเนื้อหาในรายงานเล่มนี้ ประกอบด้วย บทนำ ขั้นตอนการวิจัย การเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าแมงกานีสในเงื่อนไขต่างๆ ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง สำหรับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในรายงานเล่มนี้ คณะผู้วิจัยมีความยินดีที่จะได้รับข้อเสนอแนะจากผู้อ่าน เพื่อการปรับปรุงในการเขียนรายงานและทำวิจัยครั้งต่อไป

ประภาศ เมืองจันทร์บุรีและคณะ

มิถุนายน 2558

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(1)
Abstract	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
คำนำ	(4)
สารบัญ	(5)
รายการตาราง	(7)
รายการภาพประกอบ	(9)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(12)
บทที่ 1. บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน	3
1.2.1 การสีกหรือ	3
1.2.2 การเชื่อมพอกแข็ง	7
1.2.3 โลหะวิทยาของเนื้อโลหะพอกแข็ง	8
1.2.4 การทดสอบการสีกหรือ	13
1.2.5 เหล็กกล้าทนการสีกหรือ	14
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	15
1.5 ขอบเขตงานวิจัย	15
1.6 ประโยชน์ของงานวิจัย	16
บทที่ 2. วิธีการดำเนินโครงการวิจัย	
2.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย	17
2.2 รายละเอียดการดำเนินงานวิจัย	22
2.2.1 การเตรียมชิ้นงานเชื่อม	22
2.2.2 กรรมวิธีการเชื่อม	23
2.2.3 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค	26
2.2.4 การทดสอบการตีกระทบ	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.5 การตรวจสอบค่าความแข็ง	29
2.2.6 การตรวจสอบการสึกหรอ	29
บทที่ 3. ผลการวิจัย	
3.1 การวิเคราะห์การสึกหรอ	31
3.2 วัสดุฐาน	32
3.3 กรณีการเชื่อมชั้นสร้างเนื้อ 1 ชั้น (B-U-H และ B-U-2H)	34
3.4 กรณีการเชื่อมชั้นสร้างเนื้อ 2 ชั้น (B-2U-H และ B-2U-2H)	42
3.5 กรณีการเชื่อมชั้นสร้างเนื้อ 3 ชั้น (B-3U-H และ B-3U-2H)	50
3.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง	57
บทที่ 4. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
4.1 สรุปผลการทดลอง	60
4.2 ข้อเสนอแนะ	60
บรรณานุกรม	62
ภาคผนวก	
ก ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุฐานและลวดเชื่อม	63
ข เครื่องเชื่อม	66
ค กล้องจุลทรรศน์	68
ง สมบัติเชิงกลของการเชื่อมแต่ละเงื่อนไข	70
จ.บทความวารสาร	83

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เงื่อนไขการเชื่อมเหล็กกล้า 13 % แมงกานีส	24
3.1	ปริมาณแมงกานีสคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นบริเวณวัสดุฐาน	38
3.2	ปริมาณแมงกานีสคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นบริเวณวัสดุฐาน	46
3.3	ปริมาณแมงกานีสคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นบริเวณวัสดุฐาน	54
ก.1	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า 13 % แมงกานีส (% น้ำหนัก)	64
ก.2	ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม DIN 8556: E 18 8 Mn R 26	65
ก.3	ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม DIN8555: E 7-UM-250-KP	65
ก.4	ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม DIN 8555: E 6-UM-60	65
ง.1	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-U-H)A	71
ง.2	ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-U-H)A และ (B-U-H)AH	71
ง.3	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-U-H)W	72
ง.4	ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-U-H)W และ (B-U-H)WH	72
ง.5	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-U-2H)A	73
ง.6	ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-U-2H)A และ (B-U-2H)AH	73
ง.7	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-U-2H)W	74
ง.8	ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-U-2H)W และ (B-U-2H)WH	74
ง.9	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-2U-H)A	75
ง.10	ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-2U-H)A และ (B-2U-H)AH	75
ง.11	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-2U-H)W	76
ง.12	ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-2U-H)W และ (B-2U-H)WH	76
ง.13	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-2U-2H)A	77
ง.14	ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-2U-2H)A และ (B-2U-2H)AH	77
ง.15	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-2U-2H)W	78
ง.16	ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-2U-2H)W และ (B-2U-2H)WH	78
ง.17	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-3U-H)A	79
ง.18	ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-3U-H)A และ (B-3U-H)AH	79
ง.19	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-3U-H)W	80
ง.20	ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-3U-H)W และ (B-3U-H)WH	80
ง.21	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-3U-2H)A	81

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ง.22	ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-3U-2H)A และ (B-3U-2H)AH	81
ง.23	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-3U-2H)W	82
ง.24	ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-3U-2H)W และ (B-3U-2H)WH	82

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	เครื่องมือแบบต่างๆ	1
1.2	ฟินโม้เครื่องมือถ่านหิน	2
1.3	พื้นฐานการเสียดทาน	3
1.4	การสัมผัสกันโดยตรง 2 วัตถุ	4
1.5	การสัมผัสที่มีตัวคั่นระหว่างกลาง	4
1.6	การสึกหรอแบบครูดของฟินโม้เครื่องมือถ่านหิน	5
1.7	การไหลแบบบิสระและชิ้นงานที่สึกหรอแบบความเค้นต่ำ	6
1.8	การเกิดการเสียดสีความเค้นสูง	6
1.9	ชิ้นงานที่สึกหรอแบบการเสียดสีความเค้นสูง	7
1.10	ลักษณะต่างๆบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน	8
1.11	เฟสไดอะแกรมของเหล็ก-โครเมียม (Fe-Cr-C)	10
1.12	เซฟเลอร์ไดอะแกรม	11
1.13	ไดอะแกรมเครื่องมือทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65	13
1.14	การเกิดเวิร์คฮาร์ดเดนิง ของเหล็กกล้า 1.17C-12.8Mn-0.46Si	14
2.1	เครื่องเชื่อม	17
2.2	เทอร์โมคัปเปิ้ล	18
2.3	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง มีกำลังขยายตั้งแต่ 4-28 เท่า	18
2.4	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง มีกำลังขยายตั้งแต่ 25-500 เท่า	19
2.5	อุปกรณ์ทดสอบการสึกหรอ	19
2.6	เครื่องทดสอบการสึกหรอ	20
2.7	เครื่องชั่งน้ำหนัก	20
2.8	เครื่องทดสอบการกระแทก	21
2.9	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยของเหล็กกล้า 13 % แมงกานีส	22
2.10	การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการเชื่อม	23
2.11	การเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าแมงกานีส	23
2.12	ชิ้นงานทดสอบหลังเชื่อมพอกแข็งในอากาศ	24
2.13	การเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าแมงกานีสในแต่ละเงื่อนไข	25
2.14	โปรแกรม Image J	26
2.15	การตั้งค่าสเกลเพื่อเทียบอัตราส่วนของขนาดภาพ	27

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.16	การเลือกชนิดของภาพ	27
2.17	การเลือกพื้นที่ที่ต้องการวัด	28
2.18	การวิเคราะห์พื้นที่ที่สนใจศึกษา	28
2.19	ผลการวิเคราะห์	29
3.1	โม้คู่ที่ผลิตจากเหล็กกล้าแมงกานีส	31
3.2	รูปแบบการสึกหรอของโม้คู่	32
3.3	ชิ้นส่วนของโม้คู่	32
3.4	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าแมงกานีส	33
3.5	ความแข็งของเหล็กกล้าแมงกานีสเมื่อผ่านการตีกระทบ	34
3.6	ชั้นของชิ้นงานเชื่อม (B-U-H) A ในบรรยากาศปกติ	34
3.7	ชั้นของชิ้นงานเชื่อม (B-U-2H) A ในบรรยากาศปกติ	35
3.8	ชั้นของชิ้นงานเชื่อม (B-U-H) W โดยควบคุมอุณหภูมิชิ้นงานด้วยน้ำ	35
3.9	ชั้นของชิ้นงานเชื่อม (B-U-2H) W โดยควบคุมอุณหภูมิชิ้นงานด้วยน้ำ	35
3.10	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตามการทดลอง (B-U-H)	36
3.11	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตามการทดลอง (B-U-2H)	37
3.12	ค่าความแข็งของชิ้นงานที่เชื่อมพอกผิวแข็ง 1 ชั้น	39
3.13	ค่าความแข็งของชิ้นงานชิ้นงานที่เชื่อมพอกผิวแข็ง 2 ชั้น	39
3.14	สภาพผิวหน้าชิ้นงานก่อนและหลังตีกระทบ ก่อนการทดสอบการสึกหรอ	40
3.15	สภาพผิวหน้าชิ้นงานก่อนและหลังตีกระทบ หลังการทดสอบการสึกหรอ	40
3.16	ผลการทดสอบการสึกหรอ	41
3.17	ชั้นเชื่อมของชิ้นงานในเงื่อนไขต่างๆ	42
3.18	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตามการทดลอง (B-2U-H)	43
3.19	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตามการทดลอง (B-2U-2H)	44
3.20	โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อน	45
3.21	แมงกานีสคาร์ไบด์ที่กระจายอยู่ในเหล็กกล้าแมงกานีส	46
3.22	ค่าความแข็งของชิ้นงานที่เชื่อมชั้นสร้างเนื้อ 2 ชั้น พอกแข็ง 1 ชั้น	47
3.23	ค่าความแข็งของชิ้นงานที่เชื่อมชั้นสร้างเนื้อ 2 ชั้น พอกแข็ง 2 ชั้น	47
3.24	สภาพผิวหน้าชิ้นงานก่อนและหลังตีกระทบ ก่อนการทดสอบการสึกหรอ	48
3.25	สภาพผิวหน้าชิ้นงานก่อนและหลังตีกระทบ หลังการทดสอบการสึกหรอ	48

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.26	ผลการทดสอบการสีกหรือของชิ้นงานที่เชื่อมพอกชั้นสร้างเนื้อ 2 ชั้น	49
3.27	ชั้นเชื่อมของชิ้นงานในเงื่อนไขต่างๆ	50
3.28	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตามการทดลอง (B-3U-H)	51
3.29	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตามการทดลอง (B-3U-2H)	52
3.30	โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อน	53
3.31	ค่าความแข็งของชิ้นงานที่เชื่อมชั้นสร้างเนื้อ 3 ชั้น พอกแข็ง 1 ชั้น	54
3.32	ค่าความแข็งของชิ้นงานที่เชื่อมชั้นสร้างเนื้อ 3 ชั้น พอกแข็ง 2 ชั้น	55
3.33	สภาพผิวหน้าชิ้นงานก่อนและหลังตีกระแทก ก่อนการทดสอบการสีกหรือ	56
3.34	สภาพผิวหน้าชิ้นงานก่อนและหลังตีกระแทก หลังการทดสอบการสีกหรือ	56
3.35	ผลการทดสอบการสีกหรือของชิ้นงานที่เชื่อมพอกชั้นสร้างเนื้อ 3 ชั้น	57
4.1	การเชื่อมซ่อมชิ้นส่วนโม้คู่	61
ข.1	เครื่องเชื่อม	67
ค.1	กล้องจุลทรรศน์	69
ค.2	รายละเอียดกล้องจุลทรรศน์	69
ง.1	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-U-H)A และ (B-U-H)AH	71
ง.2	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-U-H)W และ (B-U-H)WH	72
ง.3	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-U-2H)A และ (B-U-2H)AH	73
ง.4	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-U-2H)W และ (B-U-2H)WH	74
ง.5	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-2U-H)A และ (B-2U-H)AH	75
ง.6	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-2U-H)W และ (B-2U-H)WH	76
ง.7	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-2U-2H)A และ (B-2U-2H)AH	77
ง.8	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-2U-2H)W และ (B-2U-2H)WH	78
ง.9	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-3U-H)A และ (B-3U-H)AH	79
ง.10	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-3U-H)W และ (B-3U-H)WH	80
ง.11	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-3U-2H)A และ (B-3U-2H)AH	81
ง.12	ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-3U-2H)W และ (B-3U-2H)WH	82

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A	คือ	Ampere
AC	คือ	Alternating Current
ASTM	คือ	American Society for Testing and Materials
AWS	คือ	American Welding Society
B	คือ	Buffer layer
BM	คือ	Base Metal
C	คือ	Carbon
CE	คือ	Carbon Equivalent
Cr	คือ	Chromium
DC	คือ	Direct Current
DIN	คือ	Deutsches Institut für Normung
H	คือ	Hardfacing layer
HAZ	คือ	Heat Affected Zone
HB	คือ	Hardness (Brinell)
HRC	คือ	Hardness (Rockwell scale C)
HV	คือ	Hardness (Vickers)
MMA	คือ	Manual Metal Arc Welding
Mn	คือ	Manganese
Mo	คือ	Molybdenum
Ni	คือ	Nickel
P	คือ	Phosphorus
S	คือ	Welding Speed
Si	คือ	Silicon
SMAW	คือ	Shielded Metal Arc Welding
U	คือ	Build up layer
V	คือ	Volt
W	คือ	Water
WH	คือ	Work Hardening

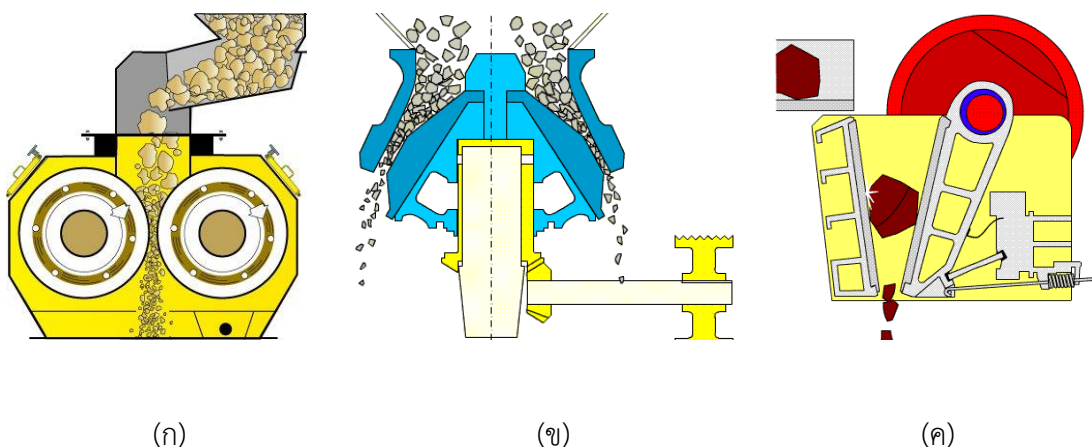
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อุตสาหกรรมเหมืองแร่เป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่จำเป็น เพื่อตอบสนองความต้องการด้านวัตถุดิบโดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรม ปัจจุบันอุตสาหกรรมเหมืองแร่ของไทยเป็นการผลิตทั้งเพื่อใช้ในประเทศเป็นส่วนใหญ่และมีบางส่วนส่งออก ได้แก่ หินปูน หินดินดานในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ หินอุตสาหกรรมเพื่อการก่อสร้าง สำหรับงานการก่อสร้างทั้งภาครัฐและเอกชน ถ่านหินซึ่งใช้เป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรม แร่ดินขาว เฟลด์สปาร์ ททรายแก้ว ใช้ในอุตสาหกรรมแก้วและเซรามิก เป็นต้น ซึ่งการทำเหมืองแร่ในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นแบบเหมืองเปิด มีการขุดเปิดหน้าดิน นำแร่มาบดย่อยขนาด แล้วจึงส่งเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆ

ในกระบวนการย่อยขนาดแร่โดยใช้โม้และเครื่องบดชนิดต่างๆ (รูปที่ 1.1 ก ถึง ค) เช่น โรลครัชเชอร์ (Roll crusher) โคนครัชเชอร์ (Cone crusher) และจอร์ครัชเชอร์ (Jaw crusher) เป็นต้น วัสดุที่ใช้กันแพร่หลายในการผลิตเครื่องบด คือ เหล็กกล้าแมงกานีส (Mn steel) เป็นเหล็กกล้าผสม 13 % แมงกานีส เนื่องจากเหล็กกล้าแมงกานีสมีโครงสร้างหลักเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิห้อง มีสมบัติเด่นที่มีความแข็งแรง (Toughness) ความเหนียว (Ductile) สูง มีความสามารถในการเพิ่มความแข็ง (Work hardening) ทำให้มีการนำเหล็กกล้าไปใช้กับงานที่รับแรงกระแทกและเกิดการสึกหรอสูง เช่น เครื่องบดย่อยขนาดแร่ในเหมืองแร่ หัวเจาะกระแทก แผ่นกันสึกหรอ เป็นต้น



รูปที่ 1.1 เครื่องโม้แบบต่างๆ (ก) โรลครัชเชอร์ (ข) โคนครัชเชอร์ (ค) จอร์ครัชเชอร์

ตัวอย่างการใช้เครื่องโม่ถ่านหิน (Crusher) ประกอบด้วยฟันโม่ (Crush roll) (รูปที่ 1.2 ก) ทำหน้าที่กระแทกถ่านหินให้แตกออก จนขนาดเล็กลงตามที่กำหนด ซึ่งเมื่อทำงานไปได้ระยะหนึ่ง พบว่ามีการสึกหรอของฟันโม่ ทำให้ประสิทธิภาพการย่อยลดลง และเมื่อถึงระยะหนึ่งจะไม่สามารถโม่ถ่านหินได้ (รูปที่ 1.2 ข) ปัญหาที่พบในเครื่องโม่โดยส่วนใหญ่เป็นปัญหาเนื่องมาจากการสึกหรอ ซึ่งเกิดจากการที่ผิวและฟันโม่ได้ผ่านการกระทบและเสียดสีกับถ่าน



(ก)

(ข)

รูปที่ 1.2 ฟันโม่เครื่องโม่ถ่านหิน (ก) ฟันโม่ปกติ (ข) ฟันโม่ที่สึกหรอ

เนื่องจากราคาของชุดโม่ค่อนข้างสูง กรณีที่เกิดการสึกหรอในปัจจุบันทำการซ่อมโดยการจ้างซ่อม ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่ามียุทธศาสตร์เลือกใช้วัสดุเชื่อมและขั้นตอนการเชื่อมที่ไม่ถูกต้อง ซึ่งจะเน้นเพียงแค่เติมเนื้อโลหะเข้าไปให้เต็มเท่าของเดิม แต่ไม่ได้คำนึงถึงพฤติกรรมการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับตัวชิ้นงาน การเชื่อมพอกแข็งของที่อื่น (หน่วยงานอื่น) ทำการเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อมประเภทเดียว คือ ลวดเชื่อมประเภทสร้างเนื้อเชื่อมเพียงชนิดเดียว ซึ่งเป็นลวดเชื่อมมาตรฐาน DIN 8555: E 7-UM-250-KP โดยมีส่วนผสมทางเคมี คาร์บอน 0.6 % ซิลิกอน 0.8 % แมงกานีส 16.5 % และ โครเมียม 13.5 % ที่มีค่าความแข็งหลังการเชื่อม 260 HB และหลังการทำเวิร์คฮาร์ดเทนนิ่งมีค่าความแข็ง 550 HB อย่างไรก็ตาม หากมีการประยุกต์องค์ความรู้เรื่องการเชื่อมพอกแข็งและการสึกหรอเข้าไปใช้ในการซ่อมฟันโม่ที่เป็นเหล็กกล้าแมงกานีสอย่างถูกต้องและเพียงพอ ก็สามารถวางแผนบริหารจัดการงานซ่อมบำรุงเครื่องโม่ให้มีอายุการใช้งานมากขึ้น และเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง อีกทั้งยังใช้องค์ความรู้นี้ไปใช้แก้ปัญหาด้านอื่นๆที่มีพฤติกรรมการสึกหรอในเหล็กกล้าแมงกานีสในลักษณะเดียวกันได้อีกด้วย

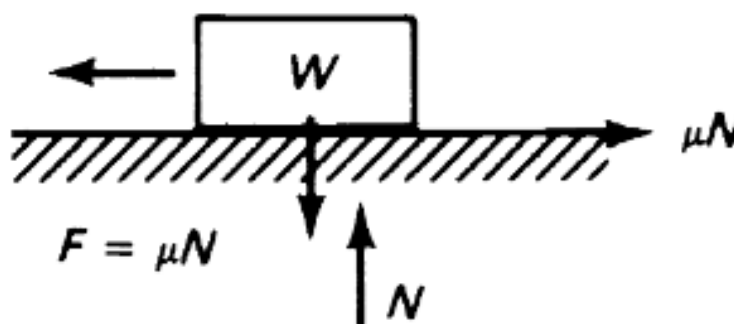
ซึ่งจากการวิเคราะห์ลักษณะการสึกหรอที่เกิดขึ้นพบว่าเป็นการสึกหรอผสมกันระหว่างการกระแทก (Impact) กับการครูด (Abrasion) ดังนั้น งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะเลือกวัสดุสำหรับการเชื่อมพอกที่ถูกต้องกับลักษณะการสึกหรอ รวมทั้งขั้นตอน (Procedure) ในการเชื่อมที่

เหมาะสม รวมถึงการทดสอบการสึกหรอภายหลังการเชื่อมพอก เพื่อยืนยันความสามารถในการต้านทานการสึกหรอ

1.2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน

จากการเก็บข้อมูลพบว่าพินโมโนในแต่ละส่วนของพินโมโนมีการสึกหรอไม่เท่ากันทั้งหมด ดังนั้นการเชื่อมเติมเนื้อโลหะเข้าไปก็จะทำให้เกิดการสึกหรอในรูปแบบเดิมอีก แต่หากมีการใช้ความรู้ทางด้านการเชื่อมพอกแข็ง (Hardfacing) เข้ามาช่วยแก้ปัญหา ก็จะสามารถควบคุมการสึกหรอให้เท่ากันทั้งชิ้นส่วน ทำให้สามารถยืดระยะเวลาในการบำรุงรักษา ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของโมสูงขึ้น

1.2.1 การสึกหรอ [1] หมายถึง กลไกการสูญหายของเนื้อวัสดุบริเวณผิว โดยกลไกทางกล (Mechanical mechanism) เกิดจากการเคลื่อนที่สัมผัสกันของผิววัสดุ ดังรูปที่ 1.3

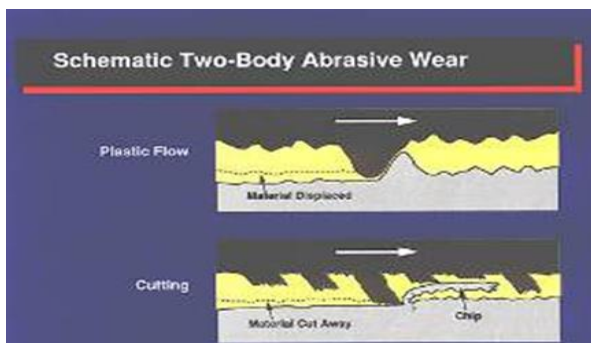


รูปที่ 1.3 พื้นฐานการเสียดทาน [1]

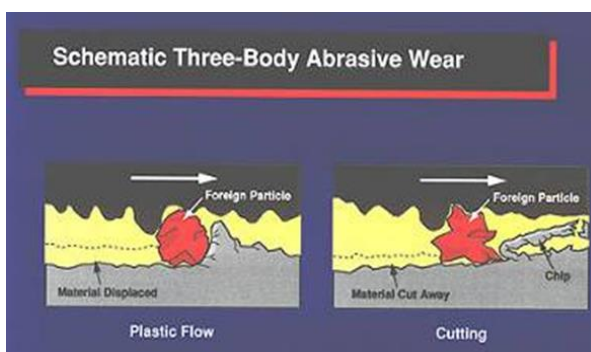
การสัมผัสกันของจำนวนวัตถุกับการสึกหรอ โดยการทำงานของชิ้นส่วนที่สัมผัสกันระหว่าง โลหะกับโลหะหรือโลหะกับวัสดุอื่นๆ เช่น หิน ทราย แร่ ถ่านหิน ดิน หรือเศษโลหะ ซึ่งสามารถแยกตามความสัมพันธ์ได้ดังนี้

(1) **ความสัมพันธ์ 2 วัตถุ (Two-body)** เป็นการสัมผัสกัน ระหว่างชิ้นส่วนกับวัตถุโดยตรง เช่น ทรายกับราง ทรายกับฟันรถดัก โม่ถ่านหิน หรือหินกับฟันรถดัก ปุ้งกี๋ ขี้เถ้ากับราง ดังรูปที่ 1.4

(2) **การสัมผัสที่มีตัวคั่นระหว่างกลาง (Three-body)** เป็นการสัมผัสกันของชิ้นงานกับวัตถุ โดยที่ชิ้นงานจะมี 2 ชิ้นและวัตถุจะอยู่ตรงกลางระหว่างชิ้นงานทั้ง 2 เช่น โม่บดหิน โม่บดถ่าน ซิลที่มีเศษโลหะฝังอยู่กับเพลลา เพลลากับร่องลื่นที่มีเศษวัสดุปนอยู่กับ จาระบีหรือน้ำมันหล่อลื่น ดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.4 การสัมผัสกันโดยตรง 2 วัตถุ [1]



รูปที่ 1.5 การสัมผัสที่มีตัวคั่นระหว่างกลาง [1]

เฟิร์สบอดี (First body) โดยทั่วไปแล้วจะหมายถึงชิ้นส่วนที่สึกหรอจากวัตถุอื่นๆ
เซคัลด์บอดี (Second body) หมายถึงวัตถุตัวที่มากกระทบ กระแทก เสียดสีหรือครูดกับเฟิร์สบอดี โดยทั่วไปแล้วจะหมายถึง ชิ้นส่วนอีกชิ้นหนึ่ง หิน แร่ ทราย ดิน ฝุ่น
เทิร์ดบอดี (Third body) หมายถึงวัตถุตัวที่ 3 ซึ่งเคลื่อนที่เข้ามาในระบบ อยู่ระหว่าง เฟิร์สบอดีและเซคัลด์บอดี หรือสิ่งแปลกปลอม (Contaminate) ที่ไม่ต้องการแทรกเข้ามาในระบบ

ชนิดของการสึกหรอ

เนื่องจากการสึกหรอ มีลักษณะแตกต่างกันตามกลไกการเกิด ซึ่งสามารถ แบ่งชนิดการสึกหรอได้ดังนี้

1. การสึกหรอแบบเสียดสี (Abrasive wear)
2. การสึกกร่อน (Erosion)
3. การสึกหรอแบบโลหะสัมผัสโลหะ (Metal to metal contact wear)
4. การสึกหรอจากการกระแทก (Impact wear)

การสึกกร่อนแบบเสียดสี เป็นการสึกกร่อนที่เกิดจากวัตถุที่แข็งกว่า (Abrasive particle) เคลื่อนที่แบบไถผ่านผิวอีกวัตถุหนึ่ง ภายใต้ภาระ (Load) ทำให้เกิด การขูดขีด ขัดถู ไถ หรือ ไถ เป็นผลให้เนื้อวัสดุหลุดหาย เป็นหลุม ร่อง ซึ่งเป็นการชำรุด 55-60 % ของการชำรุดจากการสึกกร่อนทุกแบบ

เมื่อให้ V เป็นอัตราปริมาตรการสูญหายของเนื้อวัสดุต่อหน่วยความยาวของการไถ

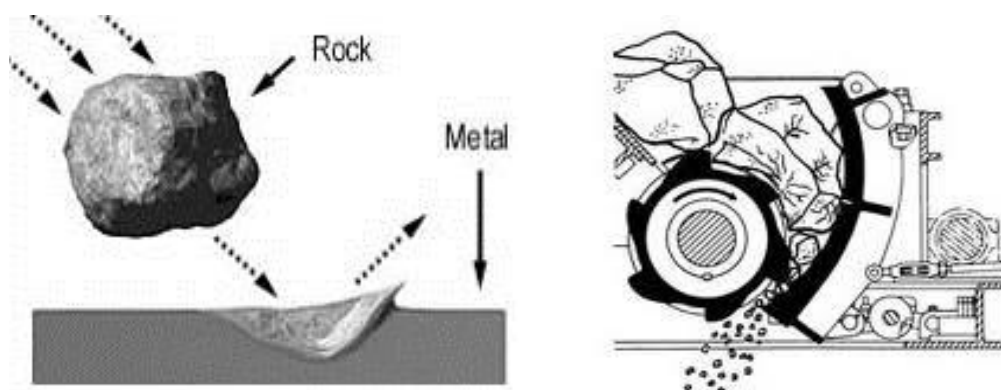
$$V = K \frac{WL}{H} \quad (1.1)$$

- เมื่อ L = ระยะของการไถ
 W = ภาระที่กระทำ โดยวัสดุ
 H = ความแข็งของผิววัตถุ
 K = ค่าสัมประสิทธิ์การสึกกร่อน (Wear coefficient)

ชนิดของการสึกกร่อนแบบเสียดสี สามารถแบ่งชนิดได้ดังนี้

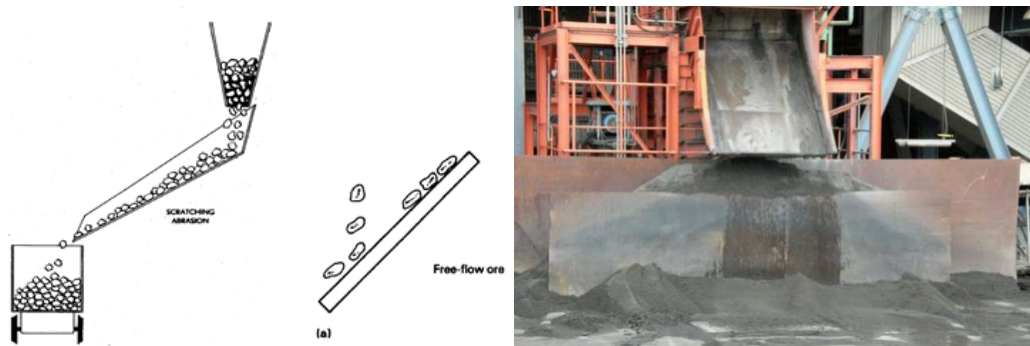
- ก. การสึกกร่อนแบบครูด (Gouging abrasion)
- ข. การเสียดสีความเค้นต่ำ (Low stress abrasion)
- ค. การเสียดสีความเค้นสูง (High stress abrasion)

การสึกกร่อนแบบครูด เป็นการสัมผัส 2 วัตถุ เกิดจากมุม ขอบ หรือคมของวัสดุ (ค่อนข้างใหญ่) ที่แข็งกว่าเคลื่อนที่ครูด ขีด บนผิวของชิ้นงาน ด้วยภาระที่สูงทำให้จุดที่เกิดการขูดขีดมีความเค้นสูง เช่น ฟันขูด ฟันบด ฟันโม่ และหัวเจาะ เป็นต้น กรณีการสึกกร่อนของฟันโม่เหมืองแม่เมาะ เกิดการสึกกร่อนอยู่ในกลุ่มของการเสียดสีแบบครูดรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 การสึกกร่อนแบบครูดของฟันโม่เครื่องโม่ถ่านหิน [1]

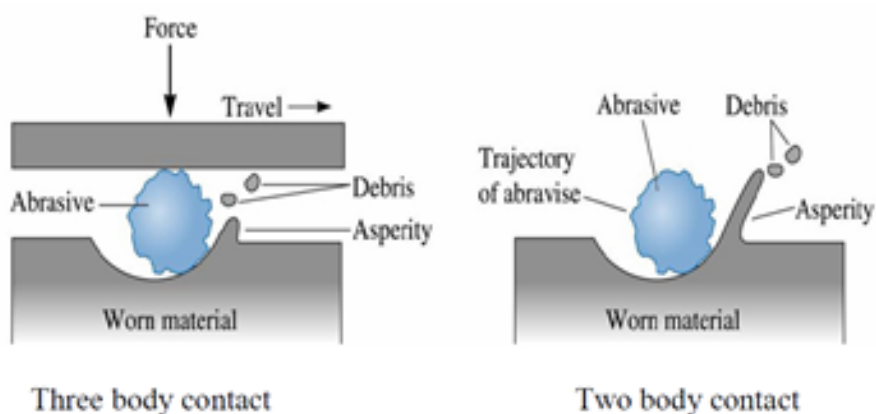
การเสียดสีความเค้นต่ำ เกิดจากวัตถุที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุและมุมหรือขอบ คม ของวัตถุค่อยๆ ชูด ชิด ใ้เนื้อวัสดุค่อยๆ หลุดหายอย่างช้าๆ อัตราการสูญเสียเนื้อขึ้นอยู่กับ อัตราการเคลื่อนที่ ที่เกิดขึ้นกับรางแต่งแร่ กระบะรถบรรทุก ปังก็ร์รถตักทรายเล็ก ปั้นดูดทราย และท่อลำเลียงทราย เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 การไหลแบบอิสระและชิ้นงานที่สึกหรอแบบความเค้นต่ำ

การเสียดสีความเค้นสูง

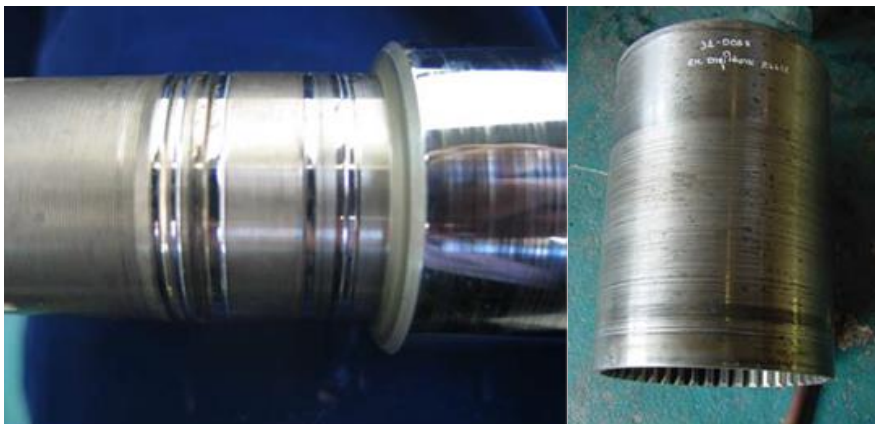
การสัมผัส 2 วัตถุ เกิดจากมุม ขอบ หรือคมของวัสดุ ขนาดเล็กๆ ที่แข็งกว่าเคลื่อนที่ ครูด ชิด ไถ บนผิวของชิ้นงานด้วยความเค้นกด เช่น ผนังปั๊มก็ ไบมีตตัน ไบกวาด เป็นต้น



รูปที่ 1.8 การเกิดการเสียดสีความเค้นสูง

การสัมผัสที่มีตัวคั่นระหว่างกลาง เกิดจากเซคันด์บอดีที่เกาะเกี่ยวและพาวัตถุขนาดเล็กๆ (เดิร์ตบอดี) เช่น ฝุ่น เม็ดทราย และผงโลหะ เป็นต้น ที่มีขนาดโตกว่าช่องว่าง (Clearance) ของชิ้นส่วนที่ออกแบบไว้ หรือโตกว่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น (Lubrication film thickness) วัตถุ

แปลกปลอมเหล่านั้น เคลื่อนที่ในการทำงานระหว่างการสั่นไถลของผิว ทำให้เกิดการ ชูด ขีด ครูด กับเฟิร์สซอบดีภายใต้ความเค้นสูง จะทำให้เกิดความเค้นเฉพาะจุด สูงมากพอที่จะทำให้เกิดการแตก หลุดเฉพาะจุดโดยเฉพาะวัตถุที่เปราะ เช่น บริเวณร่องซีล บริเวณโอรัง บุชกับเพลลา ลูกสูบกับเสื่อสูบ หรือการทำงานแบบโมบด เช่น เครื่องบดบอลมิลล์ และเครื่องบดแบบแฮมเมอร์มิลล์



รูปที่ 1.9 ชิ้นงานที่สึกหรอแบบการเสียดสีความเค้นสูง

1.2.2 การเชื่อมพอกแข็ง

การเชื่อมพอกแข็งคือ การประยุกต์ใช้วิธีการเชื่อมวัสดุที่มีความแข็งสูง ทนทานต่อการสึกหรอ ลงบนชิ้นส่วนที่ต้องการ เพื่อให้ชิ้นส่วนดังกล่าวมีความต้านทานต่อการสูญเสียเนื้อ โดยที่เนื้อโลหะของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเดิมไม่เกิดการสึกหรอ จากผลของการใช้งานที่ทำให้เกิดการสึกหรอ เช่น การสึกหรอจากการเสียดสี การสึกหรอแบบเชื่อมติด และการสึกหรอจากการกระแทก [2]

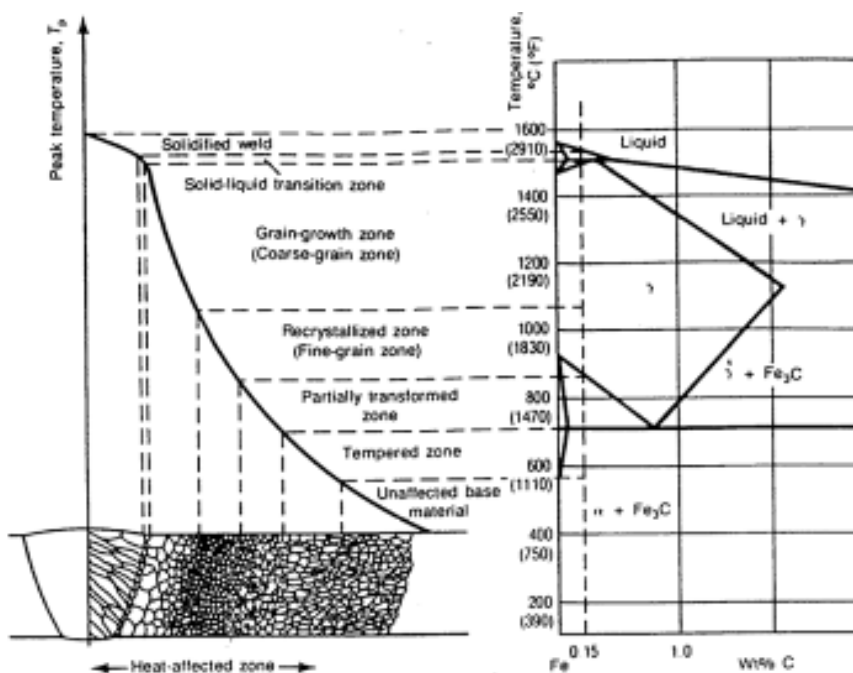
วัตถุประสงค์ของการเชื่อมพอกแข็ง

- 1) เพื่อให้ชิ้นงานมีความต้านทานต่อการสึกหรอ
- 2) เพื่อยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วน ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา
- 3) เพื่อทำให้เป็นบริเวณที่สึกหรอ ซึ่งยอมให้บริเวณดังกล่าวสึกหรอแทนบริเวณที่สำคัญ ที่ไม่ต้องการให้สึกหรอ
- 4) ทำให้ชิ้นส่วนมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกับขนาดเดิมมากที่สุด
- 5) รักษาชิ้นส่วนที่สำคัญของระบบไว้เพื่อให้ระบบใหญ่คงสภาพอยู่ได้
- 6) สามารถ ซ่อม บำรุงรักษาชิ้นส่วนที่สึกหรอได้ง่าย ทำได้ที่หน้างาน
- 7) ทำให้ประสิทธิภาพของระบบ ในเชิงการผลิต คุ่มค่าทางเศรษฐศาสตร์

1.2.3 โลหะวิทยาของเนื้อโลหะพอกแข็ง

โลหะวิทยาแนวเชื่อม

ในกระบวนการเชื่อม เกิดการหลอมละลายที่บริเวณแถบหลอมละลาย ซึ่งมีอุณหภูมิสูง 1600 °C บริเวณผลกระทบร้อน (Heat affected Zone, HAZ) จะมีอุณหภูมิ 1100-1500 °C ทำให้โครงสร้างทางจุลภาค เปลี่ยนจากเดิมที่เป็นอยู่ เช่น เเทมเปอร์มาเทนไซด์ เฟอร์ไรต์และเพอร์ไรต์ (Pearlite and ferrite) เบนไนต์ (Bainite) เปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) ที่ขนาดของเกรนโตขึ้น (Grain growth) ความร้อนจะถูกถ่ายเทอย่างรวดเร็ว ทำให้เปลี่ยนเป็นมาเทนไซด์ (Martensite) หรือ เบนไนต์ ซึ่งสมบัติทางกล ของโครงสร้างทางจุลภาคดังกล่าว มีสมบัติแตกต่างกัน เช่น ความแข็งแรงคราก ความแข็งแรงประลัยดึง ความเหนียว ความแข็ง การต่อต้านการล้า ความแข็งสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณผลกระทบจากความร้อน [3]



รูปที่ 1.10 ลักษณะต่างๆบริเวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน [3]

ในกรณีที่โครงสร้างจุลภาคเป็น มาเทนไซด์ (HV_M) เบนไนต์ (HV_B) ซึ่ง Bailey [3] ได้แสดงในรูปของความสัมพันธ์ดังนี้

$$HV_M = 802C + 305 \quad (1.2)$$

$$HV_B = 350 \left(C + \frac{Si}{11} + \frac{Mn}{8} + \frac{Cu}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{17} + \frac{Mo}{6} + \frac{V}{3} \right) + 101 \quad (1.3)$$

เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการแตกร้าวขณะเชื่อม ปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า ซึ่งจะเป็นตัวแสดงความสามารถในการเชื่อม (Weldability) ของวัสดุ และแสดงความสามารถในการชุบแข็งของวัสดุ (Hardenability) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนด อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนและหลังเชื่อม สถาบันการเชื่อมระหว่างประเทศ (The International Institute of Welding) ได้กำหนดสมการปริมาณคาร์บอนเทียบเท่าจากส่วนผสมทางเคมีไว้ดังนี้

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{5} + \frac{V}{5} \quad (1.4)$$

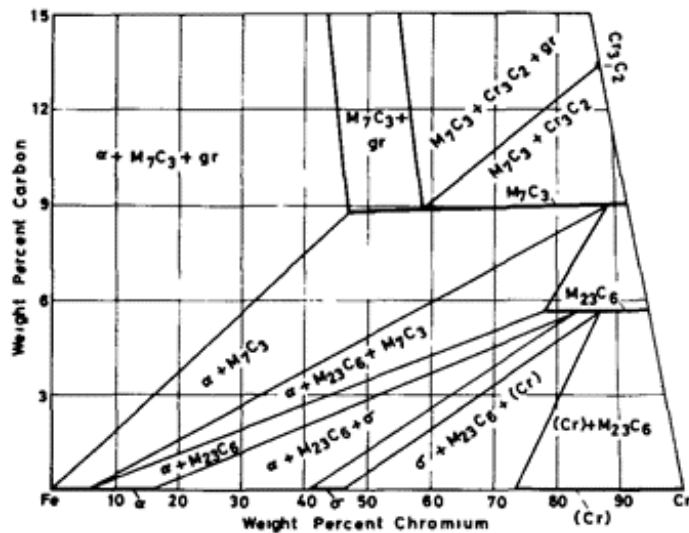
จากปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า (CE) สามารถกำหนดอุณหภูมิอุ่นขึ้นงานได้ดังนี้

- CE < 0.45 preheat 100 °C
- CE = 0.45-0.60 preheat 100-250 °C
- CE = 0.6-0.8 preheat 250-300 °C
- CE > 0.8 preheat 300-350 °C

โลหะวิทยาเนื้อเชื่อมพอกแข็ง

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของการเชื่อมพอกแข็งมีหลายปัจจัย เช่น ชนิดของเฟสที่ให้ความแข็ง รูปร่างของเฟสที่ให้ความแข็ง การกระจายตัวของเฟสที่ให้ความแข็ง ความแกร่ง และสมบัติความต้านทานการเปลี่ยนรูป (Strain hardening) ของโครงสร้างพื้นฐาน (Matrix) เป็นต้น

กระบวนการเชื่อมที่ใช้สำหรับการเชื่อมพอกแข็งมีหลายกระบวนการด้วยกัน เช่น การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ การเชื่อมมิก/แมก การเชื่อมทิก การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ และการเชื่อมใต้ฟลักซ์ ซึ่งแต่ละกระบวนการมีจุดดีจุดด้อยต่างกันไป การเลือกกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ประสิทธิภาพการเชื่อม (Welding efficiency) การเงาของเนื้อเชื่อมและราคาลวดเชื่อม โดยที่ปริมาณคาร์บอนและปริมาณโครเมียมในลวดเชื่อม เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความแข็งของรอยเชื่อม ลวดเชื่อมโครเมียมสูง (Cr-rich electrode) เป็นลวดเชื่อมที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง มีราคาไม่สูงมาก โดยคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นภายหลังการเชื่อมจะช่วยเพิ่มสมบัติการทนการสึกหรอ ชนิดของคาร์ไบด์ก็มีผลต่อสมบัติการทนการสึกหรอ หากลวดเชื่อมมีส่วนผสมของทั้งสแตน, โมลิบดีนัม และวาเนเดียม ก็จะช่วยเพิ่มสมบัติทนการสึกหรอ นอกจากนี้ คาร์ไบด์ชนิด (M_7C_3) ก็ช่วยป้องกันการเกิดการสึกหรอได้ดี [7]



รูปที่ 1.11 เฟสไดอะแกรมของเหล็กโครเมียม-คาร์บอน (Fe-Cr-C)

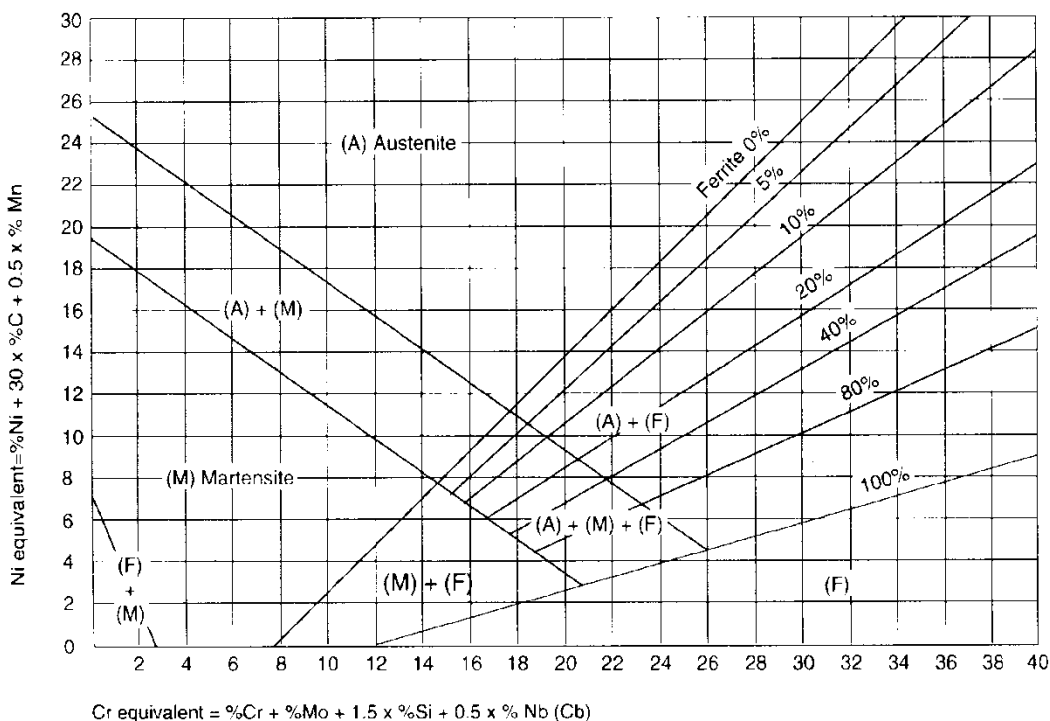
การสึกหรอบแบบเสียดสีหรือขัดถูเนื่องจากความเค้นต่ำ สามารถใช้ลวดเชื่อมชนิดเหล็กโครเมียมได้ เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง แต่ในกรณีที่รับความเค้นสูง หรือรับแรงกระแทกด้วย ลวดเชื่อมชนิดเหล็กโครเมียมจะมีสมบัติเปราะ ซึ่งจะทำให้ผิวเชื่อมแตก สมบัติทนการสึกหรอที่รับความเค้นสูง จึงไม่สามารถใช้เฉพาะสมบัติความแข็งแรงของผิวเชื่อมได้ ผิวเชื่อมจะต้องมีโครงสร้างหลักที่เหนียว และมีเฟสที่มีความแข็งแรงสูงแทรกอยู่ เช่น ลวดเชื่อมที่ให้โครงสร้างเป็นคาร์ไบด์ (Primary carbide) แทรกอยู่ในโครงสร้างออสเทนไนต์-คาร์ไบด์ ยูเทคติก เป็นต้น [5,6]

การเลือกลวดเชื่อม

1. การเลือกสมบัติของลวดเชื่อมรองรับ (Buffer)

การเชื่อมรองรับก่อนการเชื่อมพอกแข็งมีความจำเป็น เช่น ในกรณีที่เนื้อวัสดุฐาน (Base metal) และเนื้อพอกผิวแข็งมีสมบัติที่แตกต่างกันมาก อาจส่งผลทำให้เกิดการแตกหรือการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างชั้นเนื้อโลหะเดิมและชั้นพอกแข็ง ดังนั้นจึงต้องมีชั้นระหว่างกลาง เพื่อช่วยแก้ปัญหาข้างต้น หลักการการเลือกลวดเชื่อมรองรับ โดยได้ศึกษาจากงานวิจัยต่าง ๆ เช่นงานวิจัย [7] ได้สรุปว่าสำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าแมงกานีสสูง ลวดเชื่อมรองรับที่แนะนำ เช่น เหล็กกล้าโครเมียม-นิกเกิลออสเทนิติก เป็นต้น นอกจากนี้เอกสารอ้างอิงจาก [8] ได้สรุปว่าลวดเชื่อมในตระกูล E188 Mn R26 มีความเหมาะสมใช้เป็นลวดเชื่อมรองรับ เนื่องจากให้สมบัติที่เหนียวแกร่งระหว่างชั้นเชื่อมสำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง นอกจากนี้ยังต้านทานการแตก (Crack resistance) ที่ดีมาก ดังนั้นผลจากการวิจัยและ แนะนำของผู้ผลิต สามารถสรุป วิธีการตัดสินใจในการเลือกชนิดของลวดเชื่อมรองรับได้ดังนี้

- (1) ส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคเดิมของวัสดุฐาน
- (2) ส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของลวดเชื่อมรองพื้น
- (3) การเข้ากันได้ของโครงสร้างจุลภาคทั้งวัสดุฐานและชั้นรองพื้น ซึ่งเมื่อเชื่อมแล้วโครงสร้างที่ได้ของชั้นรองพื้นต้องไม่เกิดการแตกเย็น (Cold cracking) ตามโครงสร้างในเซฟเลอร์ไดอะแกรม (Schaeffler diagram) ดังรูปที่ 1.12



รูปที่ 1.12 เซฟเลอร์ไดอะแกรม [7]

- (4) สมบัติของชั้นรองพื้นต้องสามารถทนต่อการเกิดการกระแทกที่ชั้นพอกแข็งได้ โดยไม่มีการแตกร้าวนขณะใช้งาน
- (5) ชั้นรองพื้นต้องต้านทานการแตกหักและมีความเหนียวสูง ที่จะสามารถหยุดรอยร้าวก่อนที่มันจะลุกลาม (ไม่ให้ขยายตัวไปที่วัสดุฐาน) ได้
- (6) ซึ่งจากเอกสาร งานวิจัยต่างๆแนะนำให้เลือกลวดเชื่อมที่มีโครงสร้างออสเทนิติกที่สมบูรณ์ (Fully austenitic) ก่อนเป็นอันดับแรก
- (7) ในส่วนของเหล็กกล้าแมงกานีสสูง การเลือกชั้นรองพื้นให้ค้ำึงเพิ่มเติมในส่วนผสมของแมงกานีสในชั้นรองพื้น ซึ่งจะมีการเจือจาง (Dilute) ระหว่างโลหะฐาน และเนื้อเชื่อมซึ่งอาจเกิดโครงสร้างคาร์ไบด์ หรือเกิดโครงสร้างที่ทำให้เกิดการแตกเย็นได้

2. การเลือกสมบัติของลวดเชื่อมพอกแข็ง

หลักการเลือกลวดเชื่อมพอกแข็ง โดยทั่วไปลวดเชื่อมพอกแข็งสามารถแบ่งกลุ่ม ดังตัวอย่างพอสังเขป เช่น

ก. กลุ่มเหล็กกล้าผสม 14 % แมงกานีส (14 % Mn) มีสมบัติเหนียวทนและสามารถเพิ่มความแข็งได้ทนต่อแรงกระแทก

ข. มาร์เทนซิติคเหนียวทนและแข็งทนต่อแรงกระแทกและการขัดถู ลวดเชื่อมในกลุ่มนี้มีปริมาณคาร์บอนและธาตุผสมที่เพียงพอที่ทำให้โครงสร้างผิวพอกแข็งเป็นมาร์เทนซิติค ในสภาพภายหลังการเชื่อมที่เย็นตัวในอากาศ โครงสร้างมาร์เทนซิติคให้ค่าความแข็งที่สูง

ค. กลุ่มโครเมียมคาร์ไบด์ มีสมบัติแข็งและเปราะทนต่อการขัดถูได้ดี มีการแบ่งลวดเชื่อมพอกผิวแข็งตามมาตรฐาน DIN 8555 [9] ตามลักษณะกลุ่มโลหะ (Alloy group) ยกตัวอย่างบางกลุ่ม เช่น

โลหะกลุ่ม 6 มีธาตุผสมมากกว่า 5% Cr และมี คาร์บอนสูง (ประมาณ 0.2 to 2.0%) [Alloyed with more than 5% Cr, with a higher C content (About 0.2 to 2.0%.)] ความแข็งมีค่ามากกว่า 500 HB เนื้อเชื่อมจะเกิดการแข็งจากการเย็นตัวในอากาศ (Air-hardening) กลุ่มนี้ใกล้เคียงกับ (หรือเป็นกลุ่มเดียวกัน) กลุ่มมาร์เทนซิติคผสมต่ำคาร์บอนสูง (Low alloy, high carbon –martensitic) ซึ่งมีความเหมาะสมกับการขัดถูผสมกับการกระแทก (Abrasion and impact)

โลหะกลุ่ม 7 มีส่วนผสมแมงกานีสประมาณ 11-18 % เนื้อเชื่อมพอกแข็งมีความเหมาะสมกับชิ้นส่วนที่ได้รับ Work hardening โดยแรงกระแทกหรือถูกทุบ (Pressure or hammering) ค่าความแข็งสามารถขึ้นไปได้จาก 180 HB จนถึง 550 HB เป็นต้น อย่างไรก็ตามเนื้อเชื่อมไม่มีความเหมาะสมกับภาวะที่เกิดการขัดถู (Abrasion) อย่างเดียว

โลหะกลุ่ม 10 เนื้อเชื่อมมีส่วนผสมของคาร์บอน 2-7 % และมีส่วนผสมของโครเมียมจนถึงประมาณ 40 % ดังนั้นเนื้อเชื่อมจึงมีโครเมียมคาร์ไบด์ฝังอยู่ในเนื้อของเหล็กออสเทนนิติก เนื้อเชื่อมในกลุ่มนี้มีความสามารถในการทนการขัดถูได้ดีมาก

จากการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพอจะสรุปวิธีการตัดสินใจได้ดังนี้

- (1) ลักษณะการทำงานของชิ้นส่วน
- (2) ลักษณะการสึกหรอ
- (3) ส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของเนื้อลวดเชื่อม
- (4) ความแข็งที่ได้หลังจากการเชื่อม
- (5) การเข้ากันได้ของโครงสร้างเนื้อพอกแข็ง และโครงสร้างของชิ้นสร้างเนื้อ

ซึ่งลักษณะงานที่จะใช้เป็นลักษณะงานที่เกิดการสึกหรอแบบเสียดสีและรับแรงกระแทก ลวดเชื่อมมาตรฐาน DIN8555:E 6-UM-60 เป็นลวดเชื่อมที่ใช้สำหรับวัสดุฐานที่เป็น

เหล็กกล้าแมงกานีส และเหมาะสำหรับการใช้งานในลักษณะนี้ โดยมีการแนะนำว่าหากต้องการสร้างเนื้อเพื่อเพิ่มความหนาของชิ้นงานช้อนนั้น ควรเพิ่มด้วยลวดเชื่อมมาตรฐาน DIN8555:E 7-UM-250-KP โดยการเชื่อมพอกแข็งนั้นควรเชื่อมไม่เกินสองชั้นตามคู่มือลวดเชื่อม

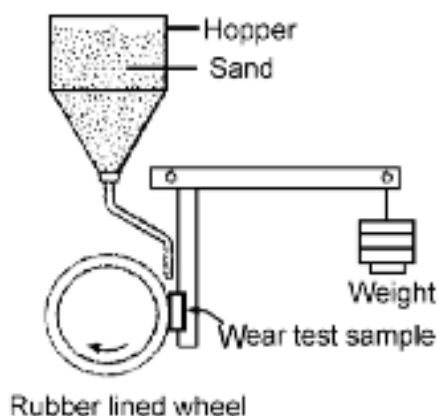
การเงาของเนื้อเชื่อม

ในกระบวนการเชื่อมที่มีการหลอมละลายรวมกันของเนื้อโลหะเชื่อมและเนื้อโลหะเดิม จะพบว่าสมบัติของเนื้อโลหะเชื่อมที่ได้ มีสมบัติเปลี่ยนแปลงไปจาก สมบัติของลวดเชื่อมที่ทางผู้ผลิตกำหนดมา ทั้งนี้เกิดจากการหลอมละลายผสมกันระหว่างลวดเชื่อมและเนื้อโลหะเดิม ซึ่งสมบัติที่ได้ใหม่ จะแตกต่างจาก ลวดเชื่อมและเนื้อโลหะเดิม ทั้งส่วนผสมทางเคมี และสมบัติทางกล

การเงาของเนื้อเชื่อม เป็นผลกระทบสำคัญที่จะลดสมบัติการทนการสึกหรอของผิวเชื่อมในขั้นแรก เนื่องจากการเงาของเนื้อเชื่อม ทำให้โครงสร้างจุลภาคของผิวเชื่อมเปลี่ยนไป จำนวนชั้นของผิวเชื่อมก็จะช่วยลดปัญหา การเงาของเนื้อเชื่อมของผิวเชื่อมได้

1.2.4 การทดสอบการสึกหรอ

ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอ (A dry sand rubber wheel machine) ตามมาตรฐาน ASTM G65 ซึ่งชิ้นงานทดสอบจะเสียดสีระหว่างทรายที่มีขนาด 50-70 เมช กับล้อยาง ดังรูปที่ 1.13 โดยทรายที่ใช้ทดสอบต้องทำการอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง ก่อนที่จะนำไปทดสอบ โดยภาวะที่ใช้ทดสอบคือ ใช้อัตราการป้อนทราย 250 กรัมต่อนาที น้ำหนักทดสอบ 13.5 กิโลกรัม ล้อยางหมุนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ทดสอบจนได้ระยะทาง ในการเสียดสี 4000 เมตร จากนั้นจึงมาหาน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานทดสอบ [10]

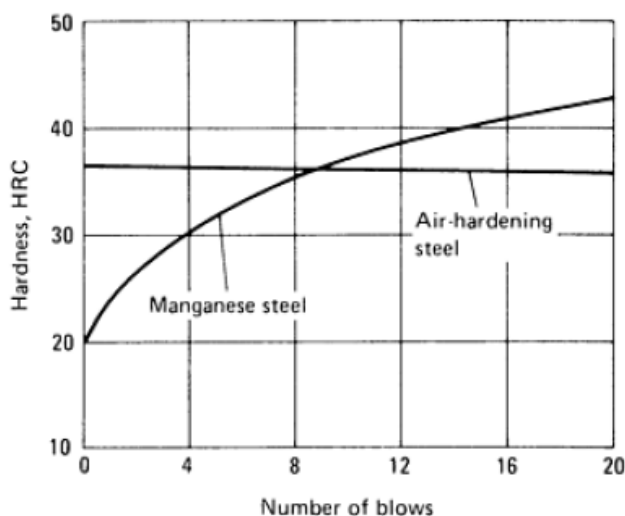


รูปที่ 1.13 ไดอะแกรมเครื่องมือทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65

1.2.5 เหล็กกล้าทนการสึกหรอ (Wear resistance steels)

โดยทั่วไปเหล็กที่มีความแข็งสูง ทนการสึกหรอ มักจะทนต่อแรงกระแทกได้น้อย ลักษณะงานบางอย่าง เช่น การบดแร่หรือการย่อยหิน จำเป็นต้องมีสมบัติทนต่อการสึกหรอ และสามารถรับแรงกระแทกได้ มีเหล็กหลายชนิดที่ถูกนำมาใช้งาน เช่น เหล็กกล้าผสมโครเมียมสูง เหล็กหล่อผสมโครเมียม-โมลิบดีนัม เหล็กกล้าผสมแมงกานีสสูง เป็นต้น

เหล็กกล้าผสมแมงกานีสสูงนิยมใช้ในงานที่ทนการสึกหรอและรับแรงกระแทก เนื่องจากเป็นเหล็กที่มี แมงกานีสผสมอยู่ในปริมาณสูง (11-14 % Mn) โดยแมงกานีสเป็นธาตุที่มีอิทธิพลในการรักษาเสถียรภาพของออสเทนไนท์ที่ค่อนข้างรุนแรง แต่แมงกานีสสามารถรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ (Mn_3C) และมีแนวโน้มจับอยู่ตามขอบเกรน ทำให้เปราะแตกง่าย ดังนั้นภายหลังการหล่อ เหล็กกล้าแมงกานีสสูงจึงต้องนำไปอบชุบเพื่อให้แมงกานีสคาร์ไบด์สลายตัวที่อุณหภูมิ 1000-1100 °C ซึ่งแมงกานีสคาร์ไบด์ละลายได้ดีในออสเทนไนต์ และเมื่อนำมาทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบน้ำ จะทำให้ได้เหล็กที่มีโครงสร้างออสเทนไนต์ที่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง โดยเหล็กที่ได้มีความเหนียว มีความแข็งต่ำ (ไม่เกิน 200 HB) ภายหลังเมื่อนำไปใช้งานในลักษณะที่ได้รับแรงกระแทกทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างที่ผิวเปลี่ยนจากออสเทนไนต์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ ซึ่งมีความแข็งสูง (400-500 HB) ทำให้ทนต่อการสึกหรอได้ดี โดยเหล็กกล้าผสมแมงกานีสสูงไม่เหมาะจะใช้งานในลักษณะที่ไม่ได้รับแรงกระแทกสูงพอ (ต่ำกว่า 680 จูล) หรือใช้งานที่อุณหภูมิสูง (350-500 °C) เพราะจะเกิดการตกตะกอนของแมงกานีสคาร์ไบด์ [11]



รูปที่ 1.14 การเกิดเวิร์คฮาร์ดเดนนิ่งของเหล็กกล้า 1.17C-12.8Mn-0.46Si

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยจาก [10] ซึ่งได้ศึกษาการเกิดเวิร์คฮาร์ดเดนนิ่งของเนื้อเชื่อมพอกแข็งออสเทนิติกแมงกานีส 3 ชนิด คือ

1. ส่วนประกอบทางเคมีทั่วไปหรือเรียกว่า Ordinary austenitic manganese (0.7-1.0 % C, 14 % Mn)
2. ส่วนประกอบทางเคมีชนิดแมงกานีสสูงหรือเรียกว่า Rich austenitic manganese (0.9-1.1 % C, over 20 % Mn, 5 % Cr)
3. ส่วนประกอบทางเคมีชนิดแมงกานีส-โครเมียมหรือเรียกว่า Austenitic manganese-chrome (0.3-0.5 % C, 15 % Mn, 15 % Cr)

โดยใช้น้ำหนักตกกระแทก (Drop weight test) โดยใช้พลังงานครั้งละ 115 ft-lb (156 J) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าส่วนประกอบทางเคมีชนิดแมงกานีสสูง (Rich austenitic manganese) และส่วนประกอบทางเคมีชนิดแมงกานีส-โครเมียม แสดงความต้านทานต่อการยุบตัวสูง (High resistance to indentation)

งานวิจัยจาก [12] ซึ่งได้ศึกษาความแข็ง และค่าความต้านทานการสึกหรอของเหล็กผสมแมงกานีสสูง ก่อนและหลังการเวิร์คฮาร์ดเดนนิ่ง ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ค่าความแข็งหลังการเวิร์คฮาร์ดเดนนิ่งมีค่าสูงกว่ามาก เช่น ก่อนการเวิร์คฮาร์ดเดนนิ่งมีความแข็งประมาณ 240-260 HV แต่หลังการเวิร์คฮาร์ดเดนนิ่งจะมีค่าประมาณ 400 HV ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ของการทดสอบการต้านทานการสึกหรอมีค่าใกล้เคียงกัน

1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อหาวัสดุเชื่อมพอกแข็งที่เหมาะสมสำหรับพินโมเหล็กกล้าแมงกานีส
2. เพื่อศึกษากิจกรรมวิธีการเชื่อมพอกแข็งพินโมเหล็กกล้าแมงกานีส
3. เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าแมงกานีสที่ผ่านการเชื่อมพอกแข็ง

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาวิธีการเชื่อมพอกแข็งเพื่อป้องกันสึกหรอของพินโมเหล็กกล้าแมงกานีส ตามขั้นตอนการเชื่อม (Welding procedure) ที่กำหนด หลังจากนั้นทำการศึกษาด้านโลหะวิทยาเพื่อเปรียบเทียบข้อแตกต่างทางโครงสร้างจุลภาค และในขั้นตอนสุดท้ายทำการทดสอบความแข็ง และความต้านทานต่อการสึกหรอ

1.6 ประโยชน์ของงานวิจัย

1. ได้วัสดุที่ใช้ในการเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าแมงกานีสที่เหมาะสม
2. ได้กรรมวิธีการเชื่อมพอกแข็งที่ถูกต้องและเหมาะสม สำหรับเหล็กกล้าแมงกานีส
3. ได้วิธีการและรูปแบบการบำรุงรักษาผิวเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าแมงกานีส

บทที่ 2

วิธีการดำเนินโครงการวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย

2.1.1 เหล็กกล้า 13 % แมงกานีสที่ได้จากการหล่อ จัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมสูง ซึ่งผ่านกระบวนการอบชุบในน้ำ โดยมีส่วนประกอบทางเคมีและค่าความแข็ง แสดงในภาคผนวก ก

2.1.2 ลวดเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมมีด้วยกัน 3 ชนิด ดังนี้

(1) ลวดเชื่อมสำหรับกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ที่ใช้สำหรับเชื่อมชั้นรองพื้น โดยใช้ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน DIN8556: E 188 Mn R26 เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 4.0 มิลลิเมตร ซึ่งรายละเอียดอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ก

(2) ลวดเชื่อมสำหรับกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ที่ใช้สำหรับเชื่อมชั้นสร้างเนื้อ โดยใช้ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน DIN8555: E 7-UM-250-KP เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 4.0 มิลลิเมตร ซึ่งรายละเอียดอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ก

(3) ลวดเชื่อมสำหรับกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ที่ใช้สำหรับเชื่อมชั้นพอกแข็ง โดยใช้ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน DIN8555: E 6-UM-60 เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 4.0 มิลลิเมตร ซึ่งรายละเอียดอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ก

2.1.3 เครื่องเชื่อมเป็นระบบอินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Fronius รุ่น TransPuls Syneqic 4000 แสดงดังรูปที่ 2.1 ควบคุมตัวแปรการเชื่อมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์และซอฟต์แวร์ของเครื่องเชื่อม ปรับตัวแปรได้โดยตรงจากหน้าจอของเครื่องเชื่อม และยังสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมตัวแปรในการเชื่อมและบันทึกค่าตัวแปรในการเชื่อม ซึ่งรายละเอียดอื่นๆ แสดงในภาคผนวก.ข



รูปที่ 2.1 เครื่องเชื่อม

2.1.4 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple type K) ยี่ห้อ Picolog ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของชิ้นงานในระหว่างการทดลอง แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เทอร์โมคัปเปิ้ล

2.1.5 กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคทางโลหวิทยา มี 2 ชนิดคือ
(1) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) มีกำลังขยายตั้งแต่ 4-28 เท่า ยี่ห้อ Olympus แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง มีกำลังขยายตั้งแต่ 4-28 เท่า

(2) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) มีกำลังขยายตั้งแต่ 25-500 เท่า ยี่ห้อ Olympus แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง มีกำลังขยายตั้งแต่ 25-500 เท่า

2.1.6 เครื่องทดสอบความแข็ง เป็นเครื่องทดสอบความแข็งระดับมหภาค วัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers) หัวกดเป็นรูปปิรามิดมุม 136° สามารถปรับแรงกดได้ตั้งแต่ 3-100 kgf. ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เครื่องทดสอบความแข็ง

2.1.7 เครื่องทดสอบการสึกหรอ และทรายขนาด 212-300 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ASTM G65 ดังรูปที่ 2.6 โดยใช้อัตราการไหลของทราย 250 กรัมต่อนาที น้ำหนักที่กระทำต่อชิ้นงาน 13.5 กิโลกรัม ล้อย่างหมุนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ระยะทางในการทดสอบเสียดสี 4000 เมตร



(ก)



(ข)

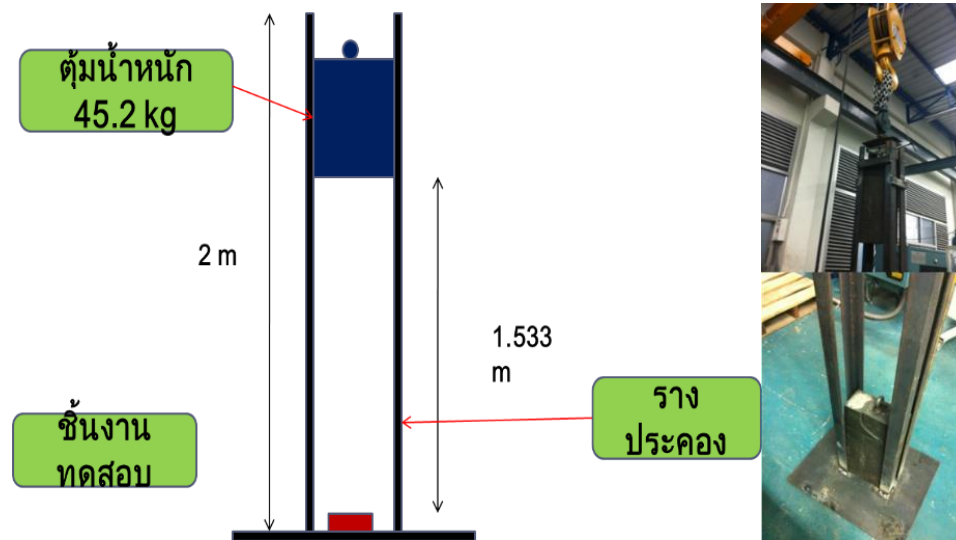
รูปที่ 2.6 อุปกรณ์ทดสอบการสึกหรอ (ก) เครื่องทดสอบการสึกหรอ
(ข) ทรายขนาด 212-300 ไมโครเมตร

2.1.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก ที่มีความแม่นยำถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (รูปที่ 2.7) ตามที่มาตรฐาน ASTM G65 กำหนดไว้ใน การทดสอบการสึกหรอ เครื่องชั่งน้ำหนักทำหน้าที่ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอ



รูปที่ 2.7 เครื่องชั่งน้ำหนัก

2.1.9 เครื่องมือทดสอบแรงกระแทก ดังรูปที่ 2.8

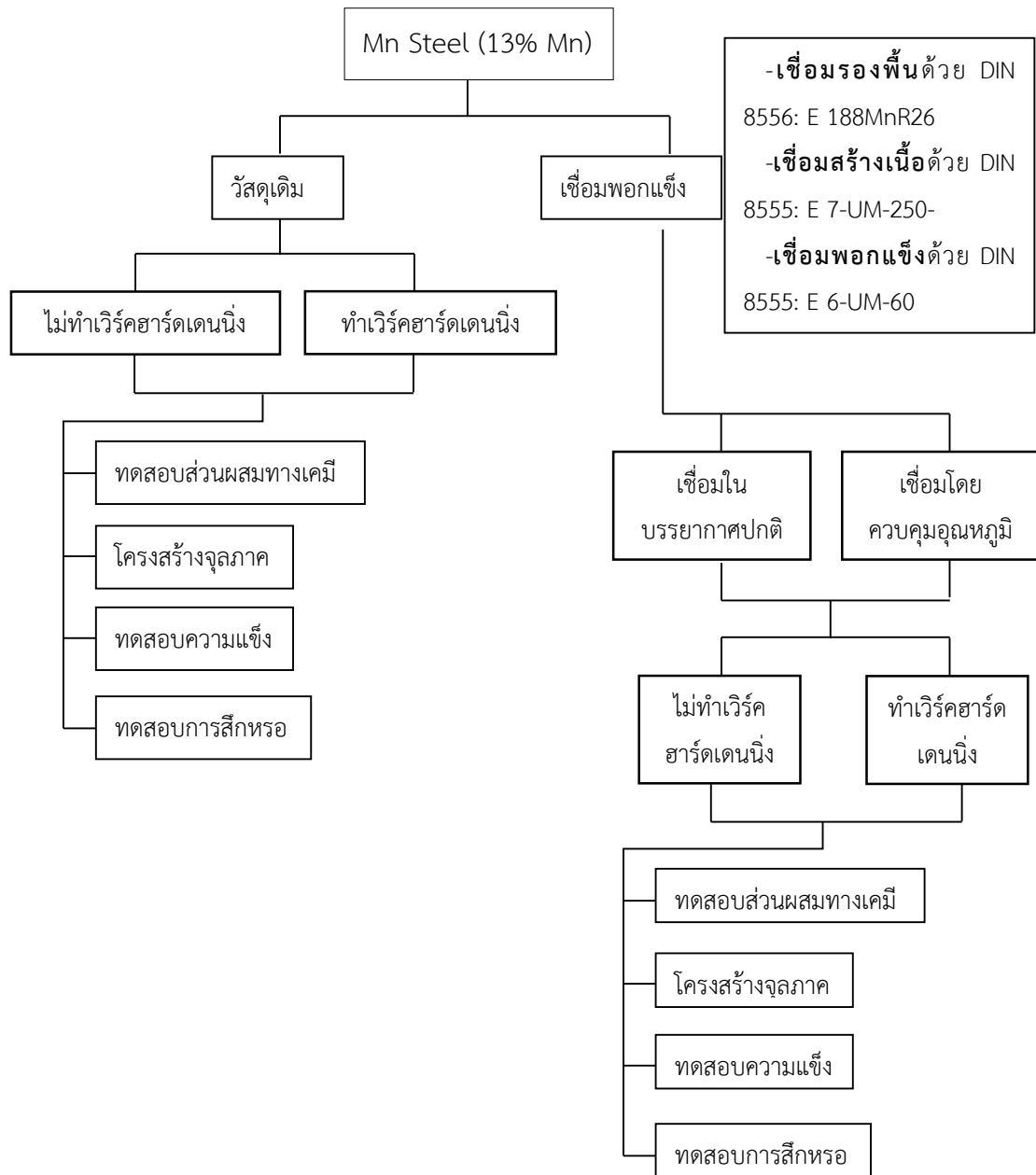


รูปที่ 2.8 เครื่องทดสอบการกระแทก

2.1.10 อุปกรณ์อื่นๆ

- (1) ผงเบเคอร์ไรต์ (Bakelite)
- (2) กระดาษทราย (SiC paper)
- (3) แผ่นสักหลาด (Polish pad)
- (4) ผงอลูมินา (Alumina oxide powder)
- (5) เครื่องเป่าลม (Blower)
- (6) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- (7) หินเจียร์ (Grinder)
- (8) เวอร์เนีย (Vernier)
- (9) แปรงทองเหลือง (Brass brush)
- (10) ค้อนเคาะสแลก (Slag hammer)
- (11) กระบอกลวดเชื่อม (Portable welding rod)
- (12) สว่าน (Driller)
- (13) กล้องถ่ายรูป
- (14) โปรแกรม Picolog Recorder
- (15) โปรแกรม Fronius Explore
- (16) โปรแกรม Image J

2.2 รายละเอียดการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยของเหล็กกล้า 13 % แมงกานีส

2.2.1 การเตรียมชิ้นงานเชื่อม

ตัดเหล็กกล้า 13 % แมงกานีส เป็นแผ่นสี่เหลี่ยม กว้าง 75 มิลลิเมตร ยาว 250 มิลลิเมตร หนา 20 มิลลิเมตร ทำความสะอาดผิวหน้าด้วยแปรงลวด

2.2.2 กรรมวิธีการเชื่อม

เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ รูปที่ 2.10 แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการเชื่อม โดยชิ้นงานเชื่อมจะวางอยู่บนแท่นสำหรับวางชิ้นงาน และต่ออยู่กับสายเทอร์โมคัปเปิลที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์อีกที ทำหน้าที่บันทึกอุณหภูมิในระหว่างการเชื่อม การเชื่อมใช้กระแสตรง (DC+) โดยชิ้นงานจะต่อเข้ากับขั้วลบของเครื่องเชื่อม และลวดเชื่อมต่อกับขั้วบวกของเครื่องเชื่อม เครื่องเชื่อมจะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลการเชื่อม ที่ประกอบไปด้วย กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ และเวลาในแต่ละแนวเชื่อม



รูปที่ 2.10 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการเชื่อม

ทำการเชื่อมชิ้นงานตัวอย่าง โดยทำการควบคุมบรรยากาศในการเชื่อมเป็น 2 สภาวะ คือเชื่อมชิ้นงานในบรรยากาศปกติ และเชื่อมชิ้นงานโดยควบคุมอุณหภูมิชิ้นงานด้วยน้ำ ดังแสดงดังรูปที่ 2.11 (ก) และ (ข)



(ก)



(ข)

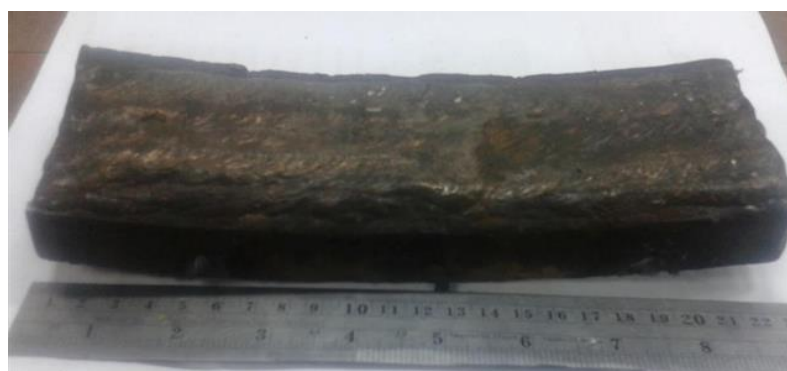
รูปที่ 2.11 การเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าแมงกานีส (ก) เชื่อมพอกแข็งในบรรยากาศปกติ (ข) เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิชิ้นงานด้วยน้ำ

โดยมีตัวแปรในการเชื่อมดังนี้

ก. เชื่อมรองพื้น โดยใช้ลวดเชื่อมมาตรฐาน AWS E 307 หรือ DIN 8556: E 18 8 Mn R26 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 มิลลิเมตร กระแสเชื่อม 120 แอมแปร์. ความต่างศักย์ 25-29 โวลต์ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 23-25 เซนติเมตรต่อนาที

ข. เชื่อมสร้างเนื้อ โดยใช้ลวดเชื่อมมาตรฐาน DIN 8555: E 7-UM-250-KP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 มิลลิเมตร กระแสเชื่อม 143 แอมแปร์ ความต่างศักย์ 20-26 โวลต์ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 21-25 เซนติเมตรต่อนาที

ค. เชื่อมพอกผิวแข็ง โดยใช้ลวดเชื่อมมาตรฐาน DIN 8555: E 6-UM-60 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 มิลลิเมตร กระแสเชื่อม 140-150 แอมแปร์ ความต่างศักย์ 23-26 โวลต์ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 23-24 เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 2.12 ชิ้นงานทดสอบหลังเชื่อมพอกแข็งในอากาศ

ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขการเชื่อมเหล็กกล้า 13 % แมงกานีส

ตัวอย่าง	บรรยากาศปกติ (จำนวนชั้น)			ควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ (จำนวนชั้น)		
	รองพื้น	สร้างเนื้อ	พอกแข็ง	รองพื้น	สร้างเนื้อ	พอกแข็ง
1.B-U-H	1	1	1	1	1	1
2.B-U-2H	1	1	2	1	1	2
3.B-2U-H	1	2	1	1	2	1
4.B-2U-2H	1	2	2	1	2	2
5.B-3U-H	1	3	1	1	3	1
6.B-3U-2H	1	3	2	1	3	2

Hardfacing
Build-up
Buffer
Base

แบบการทดลอง B-U-H

2 nd Hardfacing
1 st Hardfacing
Build-up
Buffer
Base

แบบการทดลอง B-U-2H

Hardfacing
2 nd Build-up
1 st Build-up
Buffer
Base

แบบการทดลอง B-2U-H

2 nd Hardfacing
1 st Hardfacing
2 nd Build-up
1 st Build-up
Buffer
Base

แบบการทดลอง B-2U-2H

Hardfacing
3 rd Build-up
2 nd Build-up
1 st Build-up
Buffer
Base

แบบการทดลอง B-3U-H

2 nd Hardfacing
1 st Hardfacing
3 rd Build-up
2 nd Build-up
1 st Build-up
Buffer
Base

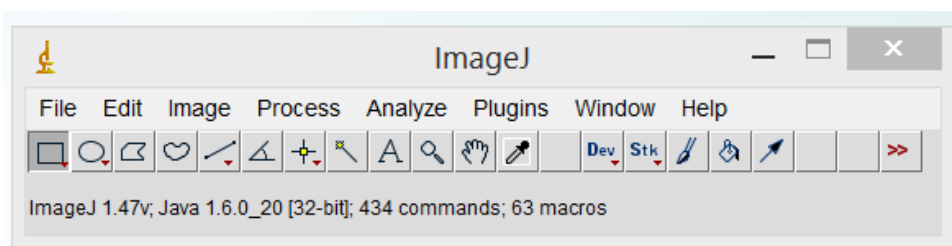
แบบการทดลอง B-3U-2H

รูปที่ 2.13 การเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าแมงกานีสในแต่ละเงื่อนไข

นำชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมมาเตรียมเป็นชิ้นงาน กว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 75 มิลลิเมตร และหนา 15 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาตีกระแทกด้วยเครื่องมือที่เตรียมไว้ แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการตีกระแทก ไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค วัดความแข็ง และทดสอบการสึกหรอ

2.2.3 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

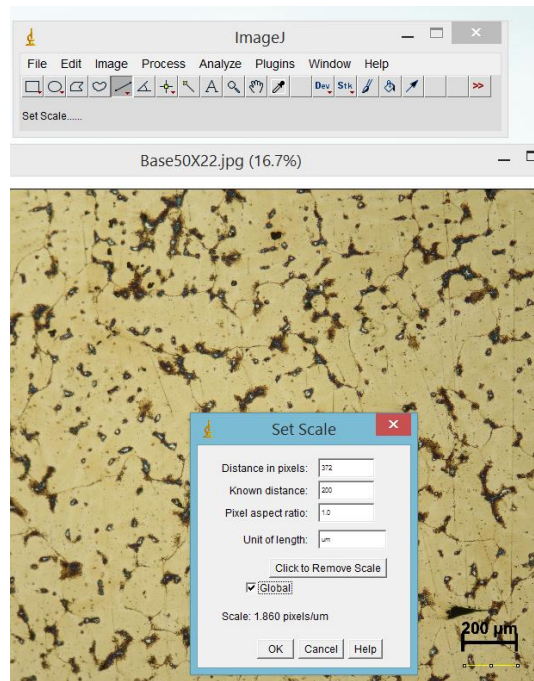
1. ตัดชิ้นงานเชื่อมกว้าง 30 มิลลิเมตร แล้วนำมากัดด้วยเครื่องกัดให้ได้ขนาด กว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 75 มิลลิเมตร และหนา 15 มิลลิเมตร โดยยังคงผิวเชื่อมด้านบนไว้
2. นำชิ้นงานที่ได้มาขัดด้วยกระดาษทรายด้านข้างของชิ้นงาน โดยใช้กระดาษทรายเบอร์ P80 P120 P180 P360 P600 P800 P1200 และ P2500 ลำดับ
3. ขัดชิ้นทดสอบด้วยผ้าสักหลาดที่มีผงอลูมินาขนาดอนุภาค 5 และ 1 ไมครอนตามลำดับ แล้วจึงนำชิ้นงานล้างให้สะอาด ทำให้แห้ง และเก็บไว้ในโถดูดความชื้น
4. นำชิ้นทดสอบมากัดกรด โดยวิธีการจุ่มลงในกรดที่เตรียมไว้ แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วทำให้แห้ง สำหรับวิธีการกัดผิวชิ้นงานในแต่ละบริเวณมีดังต่อไปนี้
 - (1) บริเวณวัสดุฐานใช้สารละลายกรด 2 % Nital ระยะเวลาในการจุ่มสารละลายกรด 10 วินาที
 - (2) บริเวณชั้นรองพื้นและชั้นสร้างเนื้อ ใช้สารละลาย Viella's ระยะเวลาในการจุ่มสารละลาย 30 วินาที
 - (3) บริเวณชั้นพอกแข็ง ใช้สารละลายกรด 10 % Nital ระยะเวลาในการจุ่มสารละลายกรด 10 นาที
5. ถ่ายภาพโครงสร้างมหภาคและจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์
6. หาปริมาณแมงกานีสคาร์ไบด์ด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพ (Image analysis) โดยมีขั้นตอนดังนี้
 - (1) ทำการถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์บริเวณที่ต้องการ
 - (2) ใช้โปรแกรม Image J ในการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โปรแกรม Image J

- (3) เปิดรูปที่ต้องการวิเคราะห์ โดยไปที่ File > open เปิดรูปที่ต้องการ
- (4) การตั้งค่าสเกลเพื่อเทียบอัตราส่วนของขนาดภาพ โดยใช้ Straight line selection คลิกลากทาบเส้นบอกขนาด 200 ไมครอน ดังรูปที่ 2.15 จากนั้นไปที่ Analyze > Set

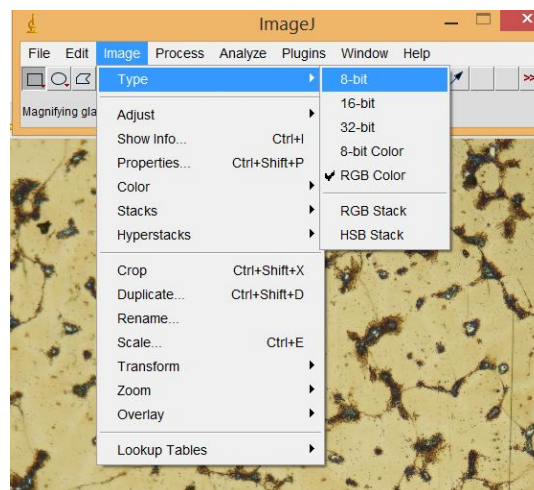
scale ใส่ค่า Known distance: 200 ใส่หน่วย Unit of length: um (ใช้ um แทน μm) จากนั้นคลิกเลือก Global แล้วกด OK



รูปที่ 2.15 การตั้งค่าสเกลเพื่อเทียบอัตราส่วนของขนาดภาพ

(5) เลือกเฉพาะส่วนของภาพที่ต้องการ โดยใช้เครื่องมือ Rectangular selection เลือกส่วนที่ต้องการ จากนั้นไปที่ Image > Crop จะได้ภาพที่ต้องการ

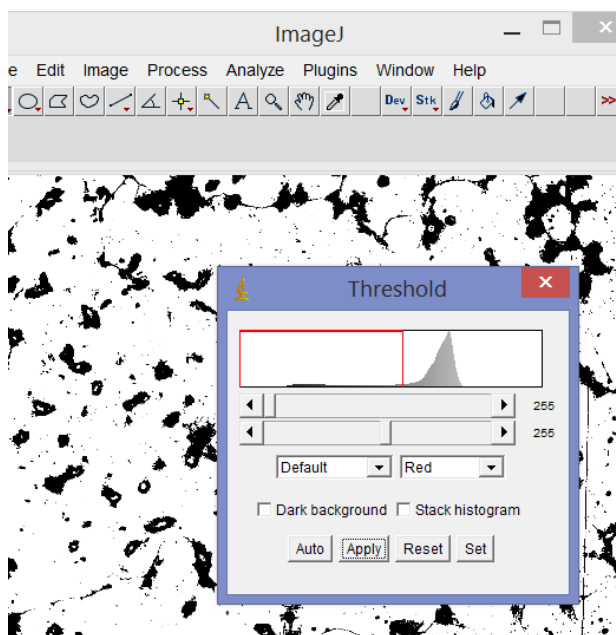
(6) ทำการเลือกชนิดของภาพ ไปที่ Image > Type > 8-bit ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การเลือกชนิดของภาพ

(7) เลือกพื้นที่ที่ต้องกันวัด โดยไปที่ Image > Adjust > Threshold ดังรูปที่

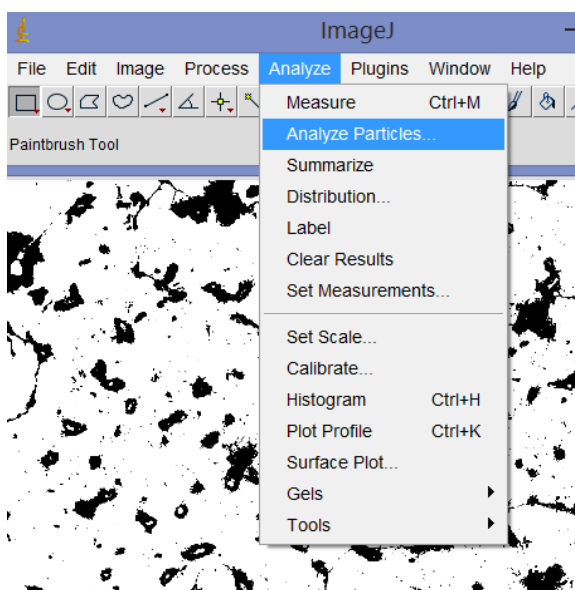
2.17



รูปที่ 2.17 การเลือกพื้นที่ที่ต้องการวัด

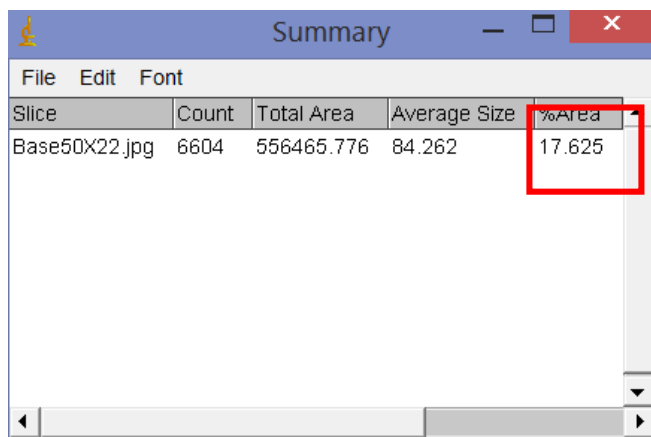
(8) ทำการวิเคราะห์พื้นที่ของบริเวณที่ต้องการ Analyze > Analyze particles

ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การวิเคราะห์พื้นที่ที่สนใจศึกษา

(9) โปรแกรมจะแสดงผล ดังรูปที่ 2.19



Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area
Base50X22.jpg	6604	556465.776	84.262	17.625

รูปที่ 2.19 ผลการวิเคราะห์

2.2.4 การทดสอบการตีกระแทก

1. เตรียมชิ้นงานขนาด กว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 75 มิลลิเมตร และหนา 15 มิลลิเมตร
2. นำชิ้นงานวางด้านล่างของเครื่องมือตีกระแทก (รูปที่ 2.8) ทำการยึดชิ้นงานด้วยดินน้ำมันเพื่อกันชิ้นงานกระเด็นหลุดออกจากบริเวณฐานเมื่อทำการตีกระแทก
3. เลื่อนแท่นน้ำหนัก (45.2 กิโลกรัม) ขึ้นไปสูง 153 เซนติเมตร เพื่อให้ได้พลังงาน 180 จูล เมื่อตีกระแทก จากนั้นปล่อยแท่นน้ำหนักให้ตกอย่างอิสระลงมาตีกระแทกกับชิ้นงาน
4. ทำการตีกระแทกซ้ำจนครบ 20 ครั้ง

2.2.5 การตรวจสอบค่าความแข็ง

การทดสอบความแข็งเป็นการตรวจสอบระดับมหภาค โดยใช้เครื่อง Vickers hardness (HV_{100}) ที่มีแรงกด 100 kgf ทดสอบชิ้นทดสอบที่ผ่านกรรมวิธีการเชื่อมพอกแข็ง โดยวัดค่าความแข็งบริเวณภาคตัดขวางของแนวเชื่อม โดยวัดไล่มาจากผิวพอกแข็ง ผ่านชั้นสร้างเนื้อ ชั้นรองพื้น และวัสดุฐาน โดยวัดความแข็งเป็นระยะห่างกัน 1 มิลลิเมตร และวัดความแข็งที่ผิวหน้าชิ้นงานของชิ้นงาน

2.2.6 การตรวจสอบการสึกหรอ

1. นำชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้ว ไปตัดในแนวตั้งฉากกับแนวเชื่อม ให้มีขนาด กว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 75 มิลลิเมตร และ หนา 15 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปกัดบริเวณด้านข้างและด้านหลัง โดยให้ผิวด้านบนของแนวเชื่อมยังคงเดิม ด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง

2. ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบการสึกหรอ ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความแม่นยำถึงทศนิยมลำดับที่ 4

3. การทดสอบการสึกหรอ ทดสอบโดยใช้ทดสอบเครื่องทดสอบการสึกหรอ ตามมาตรฐาน ASTM G65 ซึ่งชิ้นงานทดสอบจะเสียดสีระหว่างทรายที่มีขนาด 50-70 เมชกับล้อยาง โดยทรายที่ใช้ทดสอบต้องทำการอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องก่อน โดยภาวะที่ใช้ทดสอบคือ ใช้อัตราการป้อนทราย 250 กรัมต่อนาที น้ำหนักทดสอบ 13.5 กิโลกรัม ล้อยางหมุนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ทดสอบจนได้ระยะทาง ในการเสียดสี 4000 เมตร

4. ชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบหลังการทดสอบการสึกหรอ ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความแม่นยำถึงทศนิยมลำดับที่ 4

บทที่ 3

ผลการวิจัย

3.1 การวิเคราะห์การสึกหรอ

ไม้คู้ใช้เหล็กกล้าแมงกานีส เป็นวัสดุในการผลิต โดยผลิตเป็นแผ่น มีฟัน 6 ฟันในแต่ละแผ่น แล้วนำมาประกอบเป็นไม้บนแกนเหล็กโดย โดยในไม้หนึ่งลูกมีแผ่นฟันไม้ทั้งหมด 12 ฟัน ดังรูป 3.1



(ก)

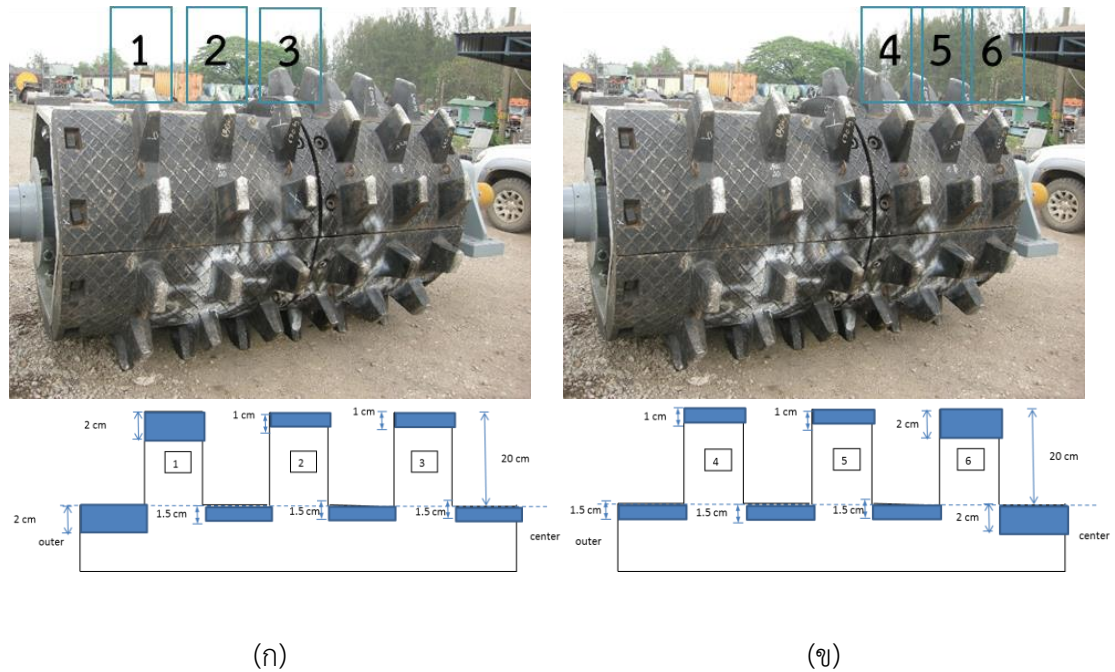
(ข)

รูปที่ 3.1 ไม้คู้ที่ผลิตจากเหล็กกล้าแมงกานีส (ก) แผ่นฟันไม้ (ข) ไม้คู้เมื่อประกอบเสร็จ

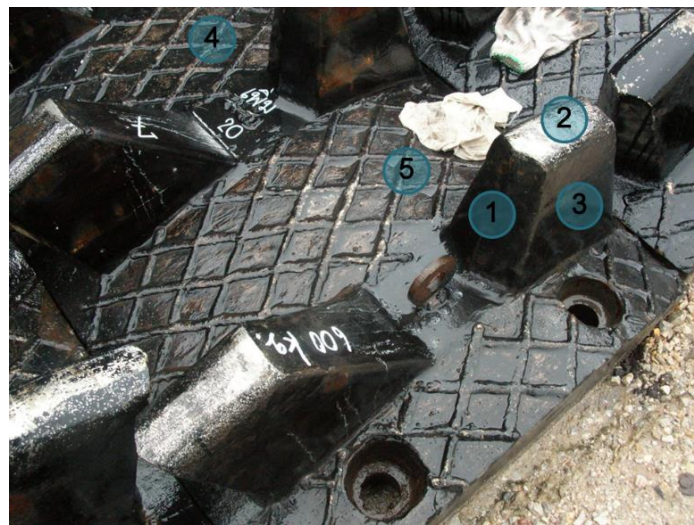
โดยจากการเก็บข้อมูลร่วมกับทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิต เหมือนแม่เมาะ พบว่าการสึกหรอของไม้คู้จะมีการสึกหรอของฟันไม้ด้านที่ติดกับผนังไม้ (ฟันที่ 1 และฟันที่ 6) มากกว่าฟันอื่นๆ โดยจากรูปที่ 3.2 การสึกหรอจะเกิดขึ้นมากที่บริเวณด้านบนของฟันไม้และพื้นที่ระหว่างฟันไม้

จากการวิเคราะห์การสึกหรอตามรูปที่ 3.3 หมายเลข 1 เป็นบริเวณที่ได้เกิดการกระแทกจากการตีถ่านหิน เกิดการสึกหรอแบบครูด (เสียดสีและกระแทก) หมายเลข 2 เป็นบริเวณที่สูญเสียเนื้อโลหะมาก เกิดการเสียดสีรุนแรง หมายเลข 3 เกิดการเสียดสีแต่ไม่รุนแรง หมายเลข 4 และ 5 เป็นบริเวณที่สูญเสียเนื้อโลหะมาก เกิดการเสียดสีรุนแรง

กลไกการต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าแมงกานีส เกิดจากได้รับแรงกระแทกแล้วมีความแข็งเพิ่มขึ้น ทำให้ต้านทานการสึกหรอได้ดี ในบริเวณหมายเลข 2 หมายเลข 4 และหมายเลข 5 เป็นบริเวณที่รับแรงกระแทกน้อยทำให้เกิดการสึกหรอมากกว่าบริเวณอื่นๆ



รูปที่ 3.2 รูปแบบการสีกหรือของไม้คู้

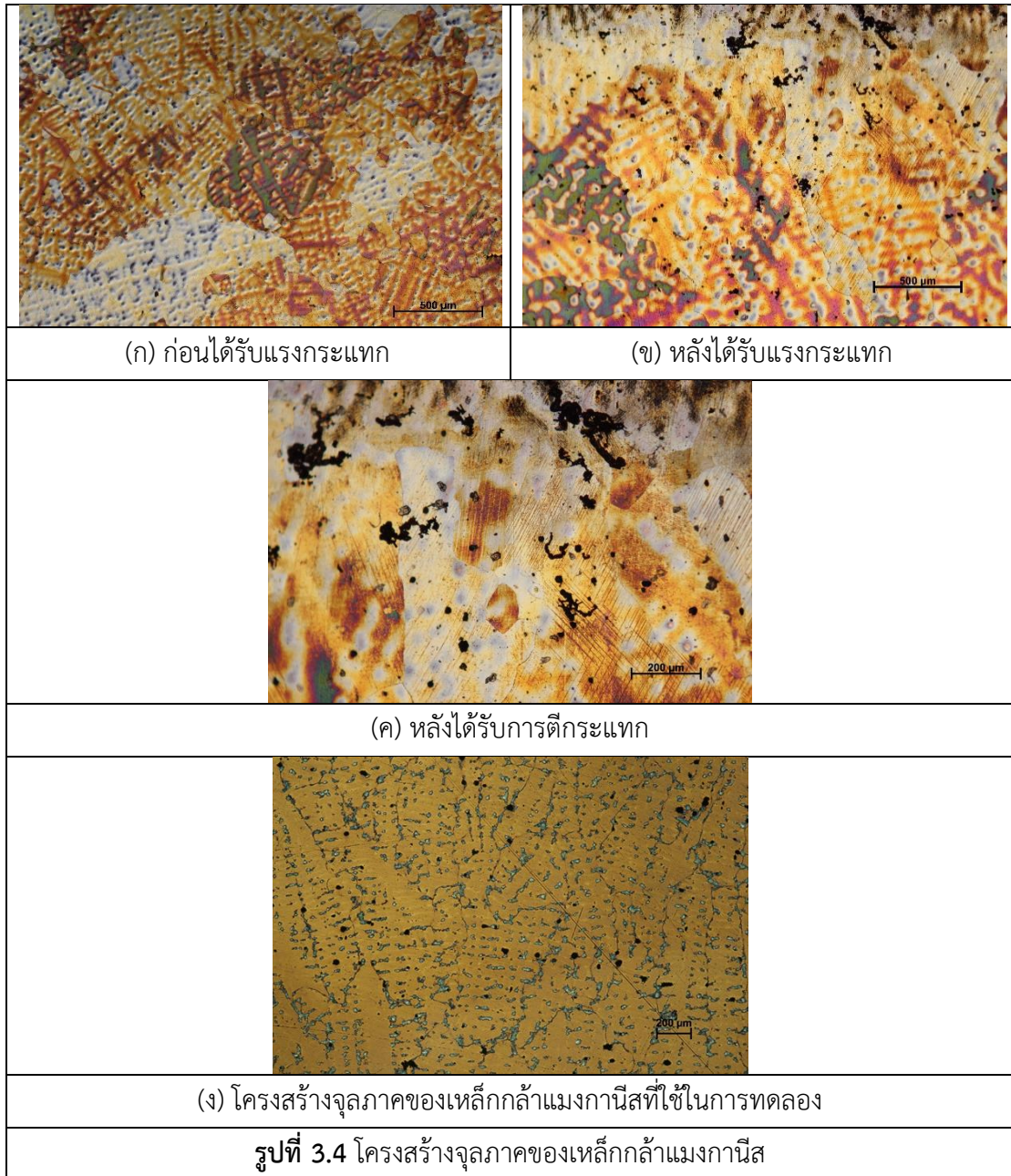


รูปที่ 3.3 ชั้นส่วนของไม้คู้

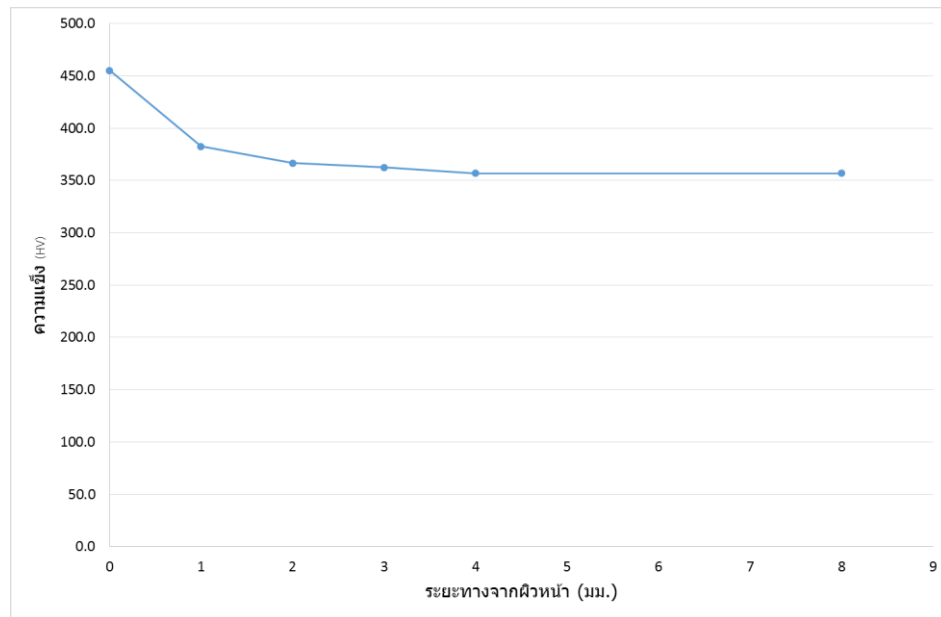
3.2 วัสดุฐาน

3.2.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 13% แมงกานีส ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1100 °C จากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยน้ำ โดยมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ และมีแมงกานีสคาร์ไบด์กระจายอยู่ตามขอบเกรน เหล็กกล้าแมงกานีสเมื่อได้รับแรงกระแทกจะมีการเกิดเวิร์คฮาร์ดเดนนิ่ง มีโครงสร้างจุลภาคดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยเมื่อได้รับแรงกระแทกจะสังเกตเห็นรอยเส้นที่เกิดจากสเตรนฮาร์ดเดนนิ่ง (Strain hardening) เป็นเส้นตรงเกิดอยู่ภายในเกรน

รูปที่ 3.4 (ค) และรูปที่ 3.4 (ง) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าแมงกานีสที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างอสเทนไนต์ที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ชัดเจน เนื่องจากเป็นชิ้นงานที่เตรียมมาจากการหล่อ โดยมีคาร์ไบด์กระจายอยู่ตามขอบเกรน



3.2.2 ผลการตรวจสอบความแข็ง เหล็กกล้าแมงกานีส ที่ยังไม่ได้รับแรงกระทำ จะมีความแข็ง 230 HV และเมื่อได้รับแรงกระทำ มีความแข็งดังแสดงในรูป 3.5 โดยที่บริเวณผิวหน้ามีความแข็ง 450 HV แล้วความแข็งค่อยๆลดลงเมื่อระยะจากผิวเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 3.5 ความแข็งของเหล็กกล้าแมงกานีสเมื่อผ่านการตีกระทบ

3.2.3 ผลการทดสอบการสึกหรอ ของเหล็กกล้าแมงกานีส ที่ไม่ได้รับแรงกระทบ มีน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 1.1320 กรัม และเหล็กกล้าที่ได้รับการตีกระทบ มีน้ำหนักที่หายไป 1.1581 กรัม โดยแม้ค่าความแข็งหลังการตีกระทบจะเพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานการสึกหรอใกล้เคียงกับการตีกระทบ

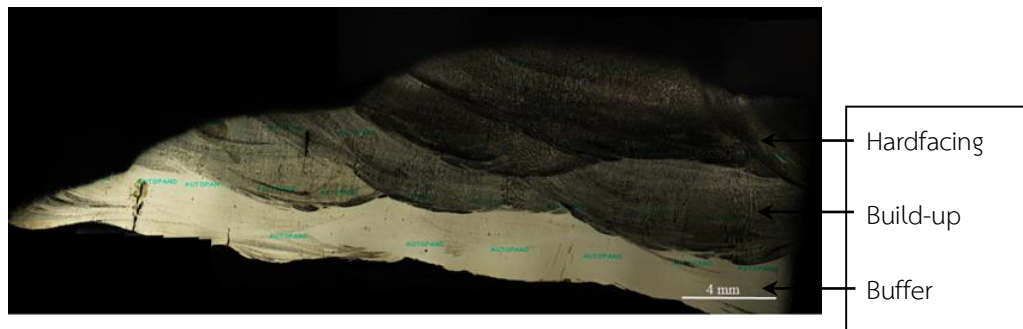
3.3 กรณีการเชื่อมโดยมีชั้นสร้างเนื้อ 1 ชั้น (B-U-H และ B-U-2H)

3.3.1 ผลวิเคราะห์ทางโลหะวิทยา

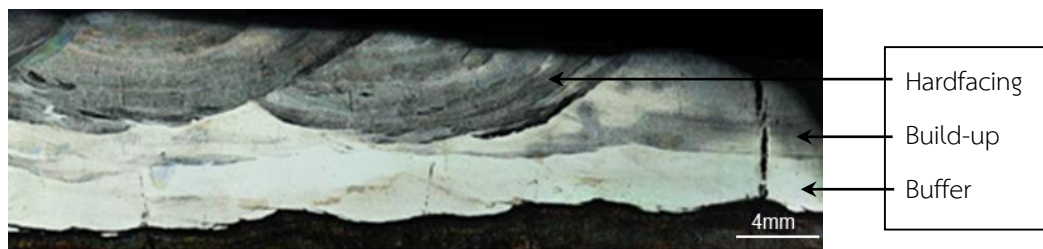
รูปที่ 3.6 ถึง รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้างของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง โดยแสดงวัสดุฐาน ชั้นรองพื้น ชั้นสร้างเนื้อ และชั้นพอกแข็ง โดยในชั้นรองพื้นจะมีความหนาประมาณ 2-2.5 มิลลิเมตร ในชั้นสร้างเนื้อจะมีความหนาประมาณ 1.5-2.0 มิลลิเมตร และในชั้นพอกแข็งจะมีความหนาประมาณ 4.0-5.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 ชั้นของชิ้นงานเชื่อม (B-U-H) A ในบรรยากาศปกติ



รูปที่ 3.7 ชั้นของชิ้นงานเชื่อม (B-U-2H) A ในบรรยากาศปกติ

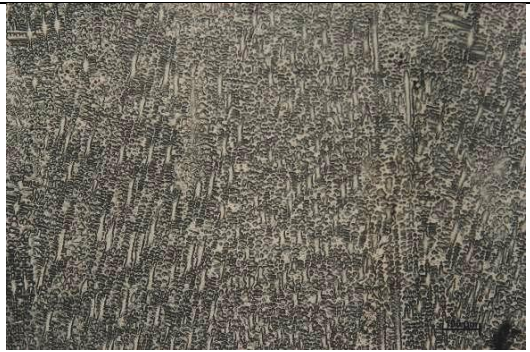


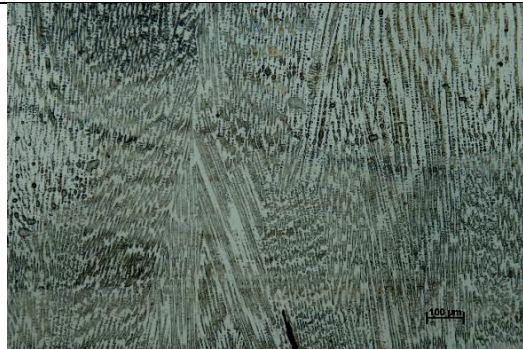

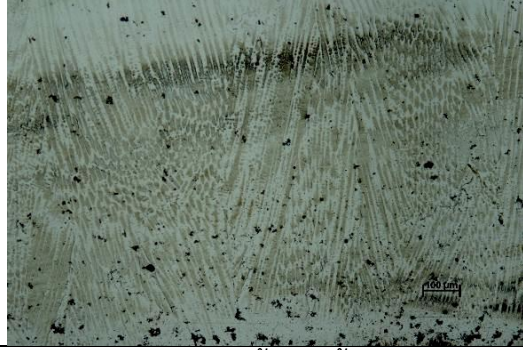
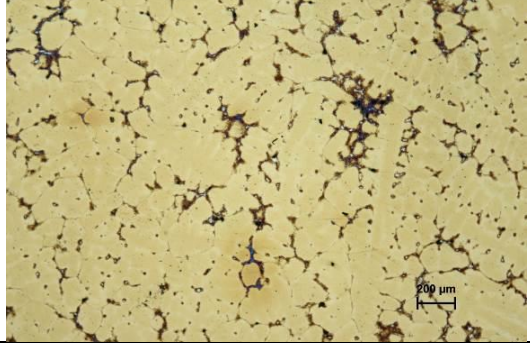
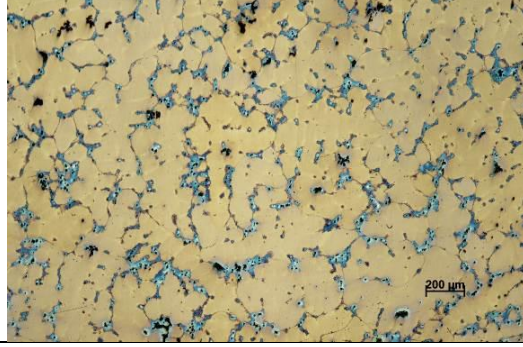


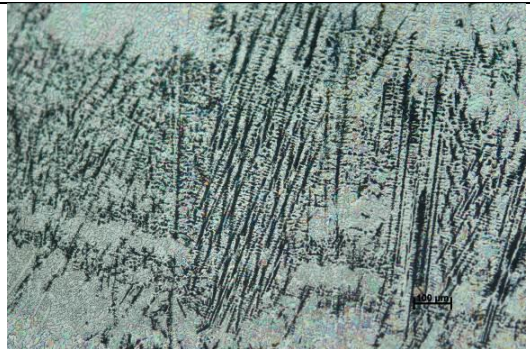


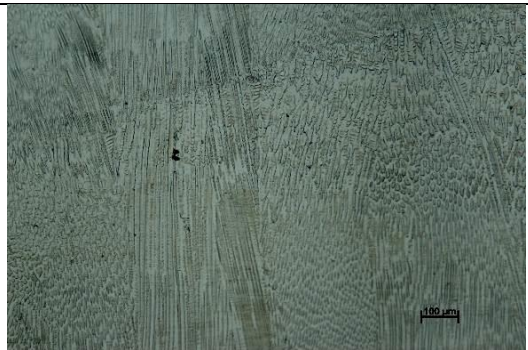


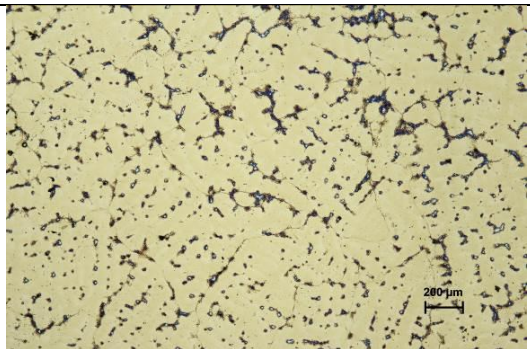
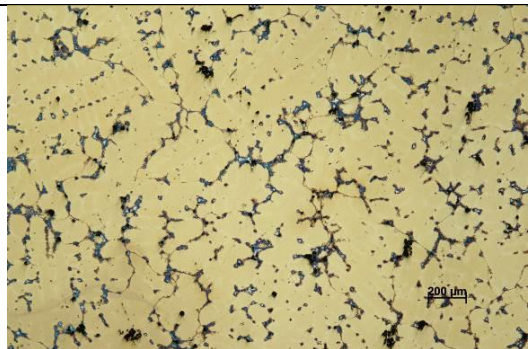
รูปที่ 3.8 ชั้นของชิ้นงานเชื่อม (B-U-H) W โดยควบคุมอุณหภูมิชิ้นงานด้วยน้ำ



รูปที่ 3.9 ชั้นของชิ้นงานเชื่อม (B-U-2H) W โดยควบคุมอุณหภูมิชิ้นงานด้วยน้ำ

รูปที่ 3.10 และ รูปที่ 3.11 แสดงโครงสร้างจุลภาคในแต่ละเนื้อเชื่อม บริเวณเนื้อวัสดุฐานจะมีโครงสร้างเป็นอสเทนไนต์ โดยจะลักษณะเกรนเป็นเดนไดรต์ชัดเจน เนื่องจากวัสดุฐานเป็นชิ้นงานเตรียมมาจากการหล่อโลหะ ในชั้นรองพื้นและชั้นสร้างเนื้อจะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเดนไดรต์โดยมีโครงสร้างเป็นอสเทนไนต์ทั้งหมด โดยในชั้นสร้างเนื้อเชื่อมในบรรยากาศ (B-H-U) พบรอยแตก ในชั้นพอกแข็งจะมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์แทรกอยู่ในอสเทนไนต์โดยอสเทนไนต์จะมีสีอ่อนกว่าส่วนที่เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ โดยผิวพอกแข็งที่เชื่อมโดยการควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่ได้จะมีลักษณะเรียวยาวแหลม มากกว่าผิวพอกแข็งที่เชื่อมในบรรยากาศปกติ โดยหากสังเกตจะเห็นว่าโครงสร้างจะเป็นแท่งเรียวยาวแหลมมากกว่า

บรรยากาศ	ควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ
	
บริเวณชั้นพอกผิวแข็ง	บริเวณชั้นพอกผิวแข็ง
	
บริเวณชั้นสร้างเนื้อ	บริเวณชั้นสร้างเนื้อ
	
บริเวณชั้นรองพื้น	บริเวณชั้นรองพื้น
	
บริเวณวัสดุฐาน	บริเวณวัสดุฐาน
รูปที่ 3.10 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตามการทดลอง (B-U-H)	

บรรยากาศ	ควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ
	
บริเวณชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่2	บริเวณชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่2
	
บริเวณชั้นสร้างเนื้อ	บริเวณชั้นสร้างเนื้อ
	
บริเวณชั้นรองพื้น	บริเวณชั้นรองพื้น
	
บริเวณวัสดุฐาน	บริเวณวัสดุฐาน
รูปที่ 3.11 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตามการทดลอง (B-U-2H)	

ตารางที่ 3.1 ปริมาณแมงกานีสคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นบริเวณวัสดุฐาน

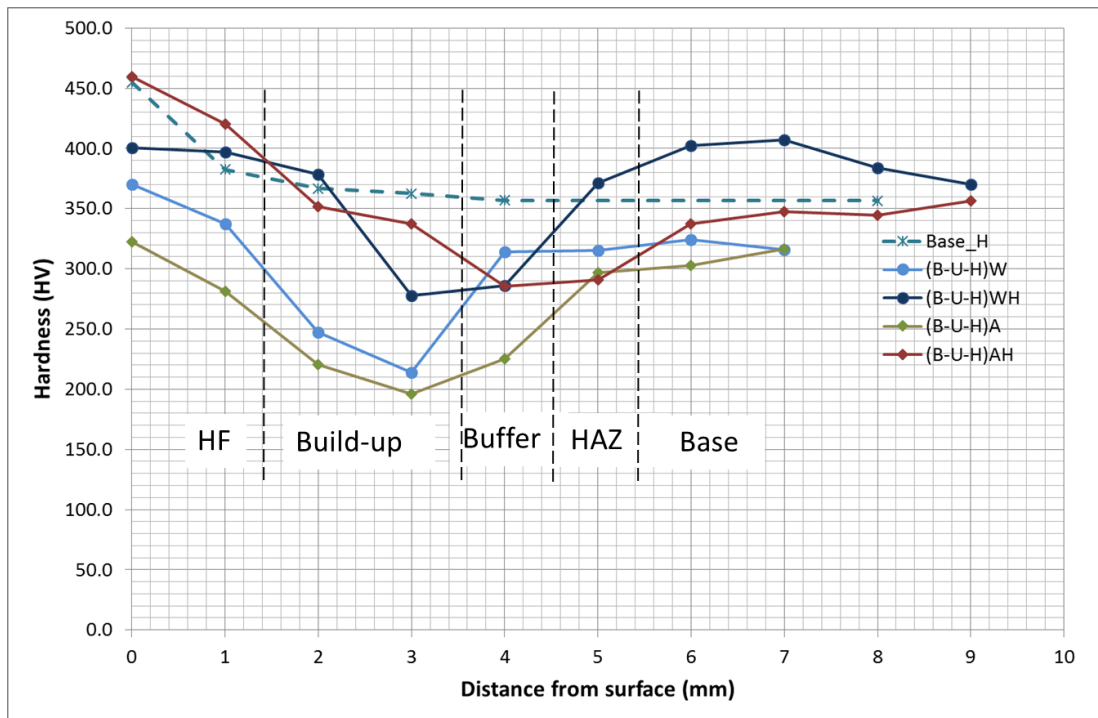
ตัวอย่าง	ปริมาณแมงกานีสคาร์ไบด์ (% พื้นที่)
(B-U-H)A บรรยากาศ	9.4
(B-U-H)W น้ำ	9.1
(B-U-2H)A บรรยากาศ	11.7
(B-U-2H)W น้ำ	11.1

จากการศึกษาด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย ปริมาณของแมงกานีสคาร์ไบด์ที่บริเวณวัสดุฐานของกรณีที่มีการเชื่อมพอกแข็งสองชั้น (B-U-2H) จะมีปริมาณของแมงกานีสคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นในวัสดุฐานมากกว่ากรณีที่มีการเชื่อมพอกแข็งชั้นเดียว (B-U-H) สำหรับการเชื่อมในบรรยากาศ และการเชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ ปริมาณของแมงกานีสคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ มีปริมาณต่ำกว่าเล็กน้อย

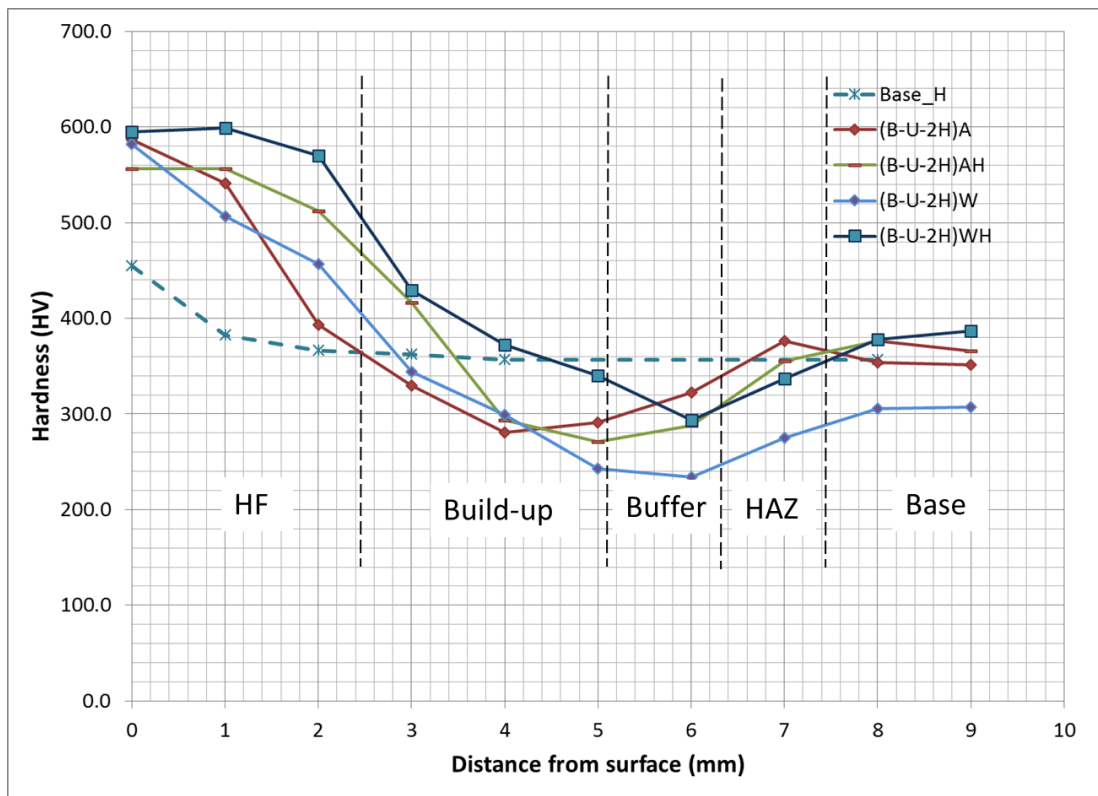
3.3.2 ค่าความแข็ง

รูปที่ 3.12 และ รูปที่ 3.13 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงาน โดยวัดความแข็งจากผิวหน้าชิ้นงานลงไปตามความลึกผ่านชั้นเชื่อมต่างๆ ผลการทดสอบความแข็ง ชิ้นงานที่เชื่อมพอกผิวแข็ง 1 ชั้นให้ความแข็งที่ผิว 320-450 HV ชิ้นงานที่เชื่อมพอกผิวแข็ง 2 ชั้น ให้ความแข็งที่ผิว 550-600 HV โดยชิ้นงานที่พอกผิวแข็ง 1 ชั้น ให้ความแข็งใกล้เคียงกับเหล็กกล้าแมงกานีสที่ผ่านการตีกระแทก ซึ่งมีความแข็งที่ผิว 450 HV ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอกผิวแข็ง 2 ชั้นให้ความแข็งที่สูงกว่าเหล็กกล้าแมงกานีสที่ผ่านการตีกระแทก

สำหรับชิ้นงานที่ผ่านตีกระแทก บริเวณชั้นสร้างเนื้อจะมีความแข็งสูงกว่าชิ้นงานที่ยังไม่ได้ผ่านการตีกระแทก เป็นส่วนของชั้นสร้างเนื้อซึ่งเมื่อผ่านการตีกระแทกก็จะเกิดเวิร์คฮาร์ดเดนนิ่ง ทำให้ค่าความแข็งที่บริเวณนั้นเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเหมือนกับค่าความแข็งที่บริเวณวัสดุฐาน (ความลึกจากผิวมากกว่า 5 มิลลิเมตรในการทดลอง B-U-H และ ความลึกจากผิวมากกว่า 7 มิลลิเมตร ในการทดลอง B-U-2H) คือชิ้นงานที่ผ่านการตีกระแทกจะมีความแข็งสูงกว่าชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการตีกระแทก ความแข็งบริเวณชั้นรองพื้น (ความลึกจากผิว 3-4 มิลลิเมตร ในการทดลอง B-U-H และความลึกจากผิว 4-5 มิลลิเมตร ในการทดลอง B-U-2H) จะมีค่าต่ำที่สุด มีค่า 200-300 HV โดยความแข็งของวัสดุฐานเมื่อผ่านการเชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิจะมีค่าต่ำกว่า การเชื่อมในบรรยากาศ โดยความแข็งของวัสดุฐานที่ไม่ผ่านการเชื่อมจะมีความแข็ง 230 HV ซึ่งต่ำกว่าวัสดุฐานที่ผ่านการเชื่อมมาแล้ว




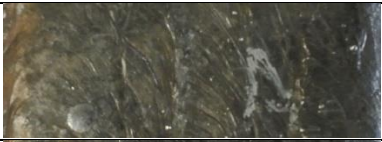




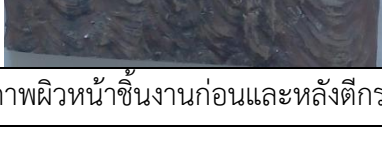

รูปที่ 3.12 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่เชื่อมพอกผิวแข็ง 1 ชั้น





รูปที่ 3.13 ค่าความแข็งของชิ้นงานชิ้นงานที่เชื่อมพอกผิวแข็ง 2 ชั้น

3.3.3 การทดสอบการสึกหรอ

สภาพผิวหน้าของชิ้นงานก่อนและหลังตีกระแทกแสดงในรูปที่ 3.14 และ รูปที่ 3.15 ในชิ้นงาน B-U-H ทั้งที่เชื่อมในบรรยากาศ และเชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ เมื่อผ่านการตีกระแทก ชิ้นงานไม่มีรอยแตกให้เห็น ในชิ้นงาน B-U-2H ที่เชื่อมในบรรยากาศ เมื่อผ่านการตีกระแทกพบรอยแตกเล็กๆ ตามผิวหน้าชิ้นงาน ชิ้นงาน B-U-2H ที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ เมื่อผ่านการตีกระแทกพบรอยแตกขนาดใหญ่ ที่ผิวหน้าชิ้นงาน

ตัวอย่าง	ก่อนการตีกระแทก	หลังการตีกระแทก
(B-U-H)A บรรยากาศ		
(B-U-H)W น้ำ		
(B-U-2H)A บรรยากาศ		
(B-U-2H)W น้ำ		

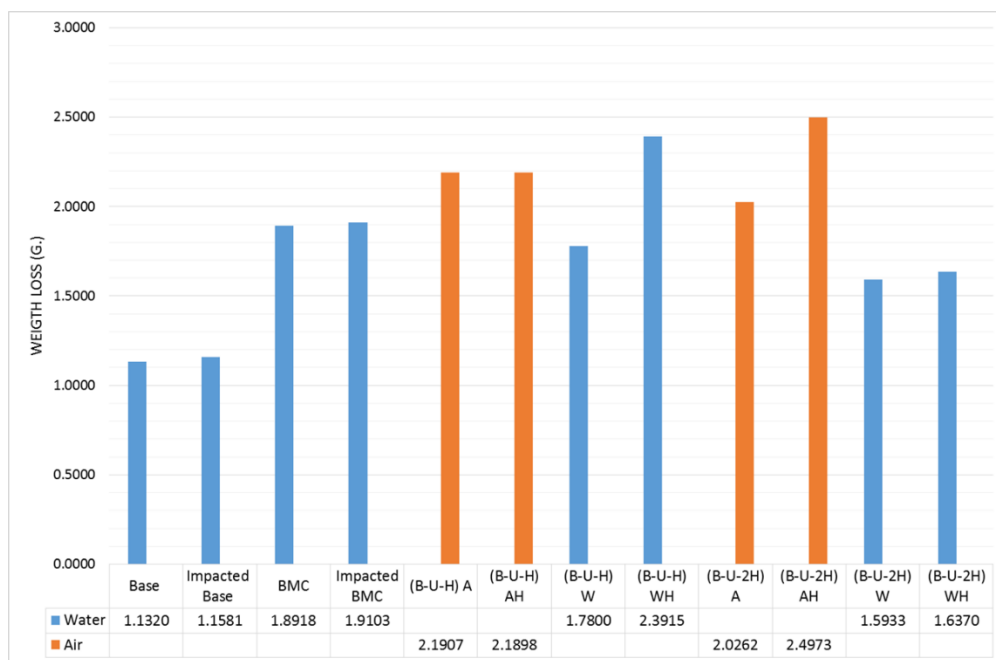
รูปที่ 3.14 สภาพผิวหน้าชิ้นงานก่อนและหลังตีกระแทก ก่อนการทดสอบการสึกหรอ

ตัวอย่าง	ก่อนการตีกระแทก	หลังการตีกระแทก
(B-U-H)A บรรยากาศ		
(B-U-H)W น้ำ		
(B-U-2H)A บรรยากาศ		
(B-U-2H)W น้ำ		

รูปที่ 3.15 สภาพผิวหน้าชิ้นงานก่อนและหลังตีกระแทก หลังการทดสอบการสึกหรอ

รูปที่ 3.16 แสดงผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่เชื่อมชั้นสร้างเนื้อ 1 ชั้น โดยชิ้นงาน B-U-2H ที่ทำการเชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำจะทนการสึกหรอได้ดี โดยมีน้ำหนักที่

หายไป 1.5933 กรัม ก่อนการตีกระแทก และหลังตีกระแทกมีน้ำหนักที่หายไป 1.6370 กรัม โดย
 ชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศ จะทนการสึกหรอได้น้อยกว่า ชิ้นงานที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ
 และชิ้นงานเมื่อผ่านการตีกระแทกแล้ว จะทนการสึกหรอได้น้อยกว่า ชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการตีกระแทก
 เนื่องจากเมื่อผ่านการตีกระแทกแล้วมีรอยแตกเกิดขึ้นทำให้มีการสูญเสียเนื้อโลหะได้ง่ายกว่าก่อนมี
 รอยแตกเนื่องจากทรายที่ใช้ในการทดสอบสามารถแทรกเข้าไปในรอยแตกทำให้มีบริเวณที่เกิดการเสียด
 สัมมากขึ้น



รูปที่ 3.16 ผลการทดสอบการสึกหรอ

จากภาพถ่ายถ่ายโครงสร้างมหภาค กรณีที่เชื่อมชั้นสร้างเนื้อ 1 ชั้น จะพบรอยแตก
 ขนาดเล็กกระจายอยู่ในทุกเงื่อนไขการเชื่อม ในกรณีเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น (B-U-H) ชิ้นงานที่เชื่อมโดย
 ควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำจะมีความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศ เนื่องจากน้ำช่วยถ่ายเท
 อุณหภูมิระหว่างการเชื่อม ทำให้อัตราการเย็นตัวของชั้นผิวพอกแข็งเร็วกว่าชิ้นงานที่เชื่อมใน
 บรรยากาศ โดยดูได้จากโครงสร้างจุลภาคของชั้นผิวพอกแข็งจะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีลักษณะ
 เรียวแหลมกว่า เมื่อผ่านการตีกระแทกไม่พบรอยแตกขนาดใหญ่ที่ผิวหน้ารอยเชื่อม เนื่องจากความ
 แข็งของชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น มีความแข็งแรงเพียง 450 HV ทำให้ยังสามารถรับแรงกระแทกได้
 โดยชิ้นงาน B-U-H ที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ ให้ผลการทนการสึกหรอที่ดีที่สุด

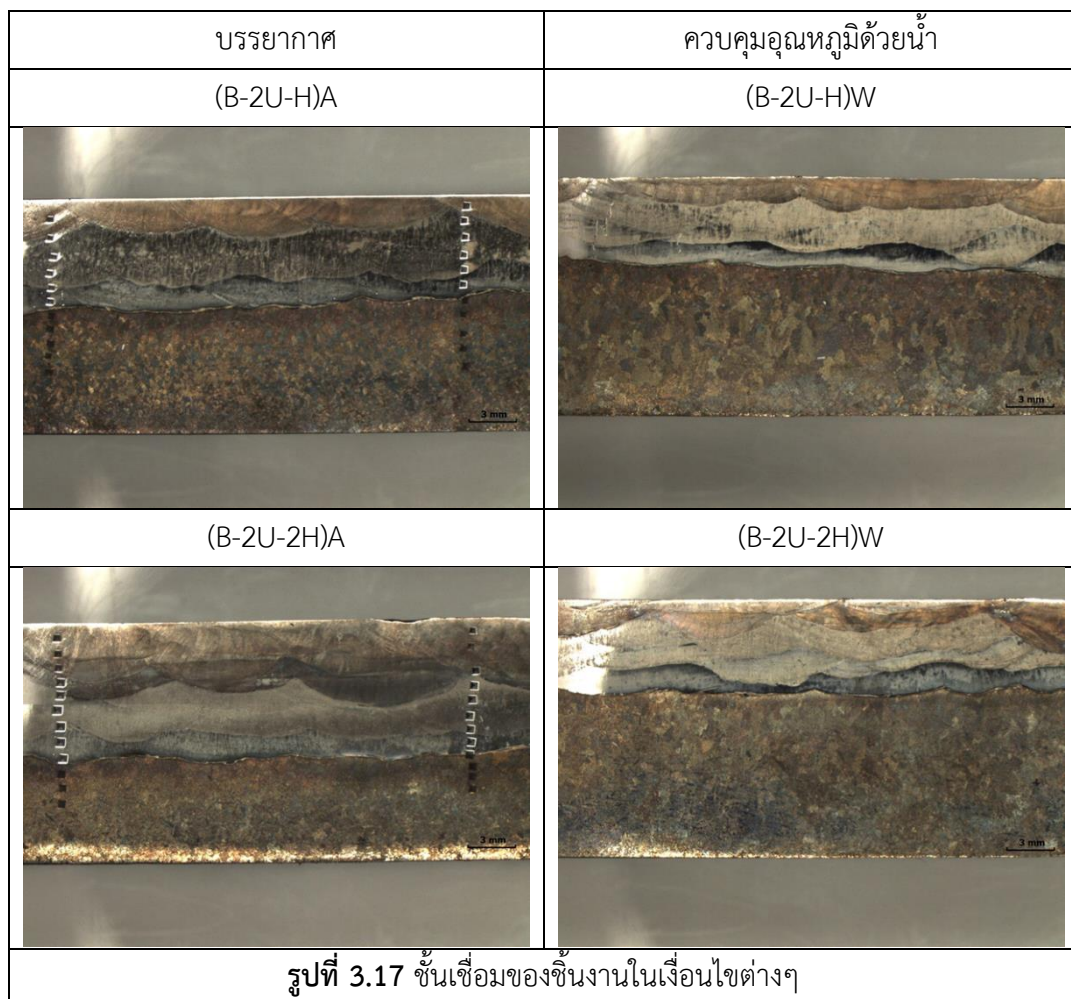
ในกรณีเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น (B-U-2H) ชิ้นงานที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ
 และเชื่อมในบรรยากาศ มีความแข็งแรงใกล้เคียงกัน (580 HV) แต่โครงสร้างจุลภาคของชั้นผิวพอกแข็ง
 ของชิ้นงานที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำจะมีลักษณะเกรนที่ละเอียดกว่าชิ้นงานที่เชื่อมใน

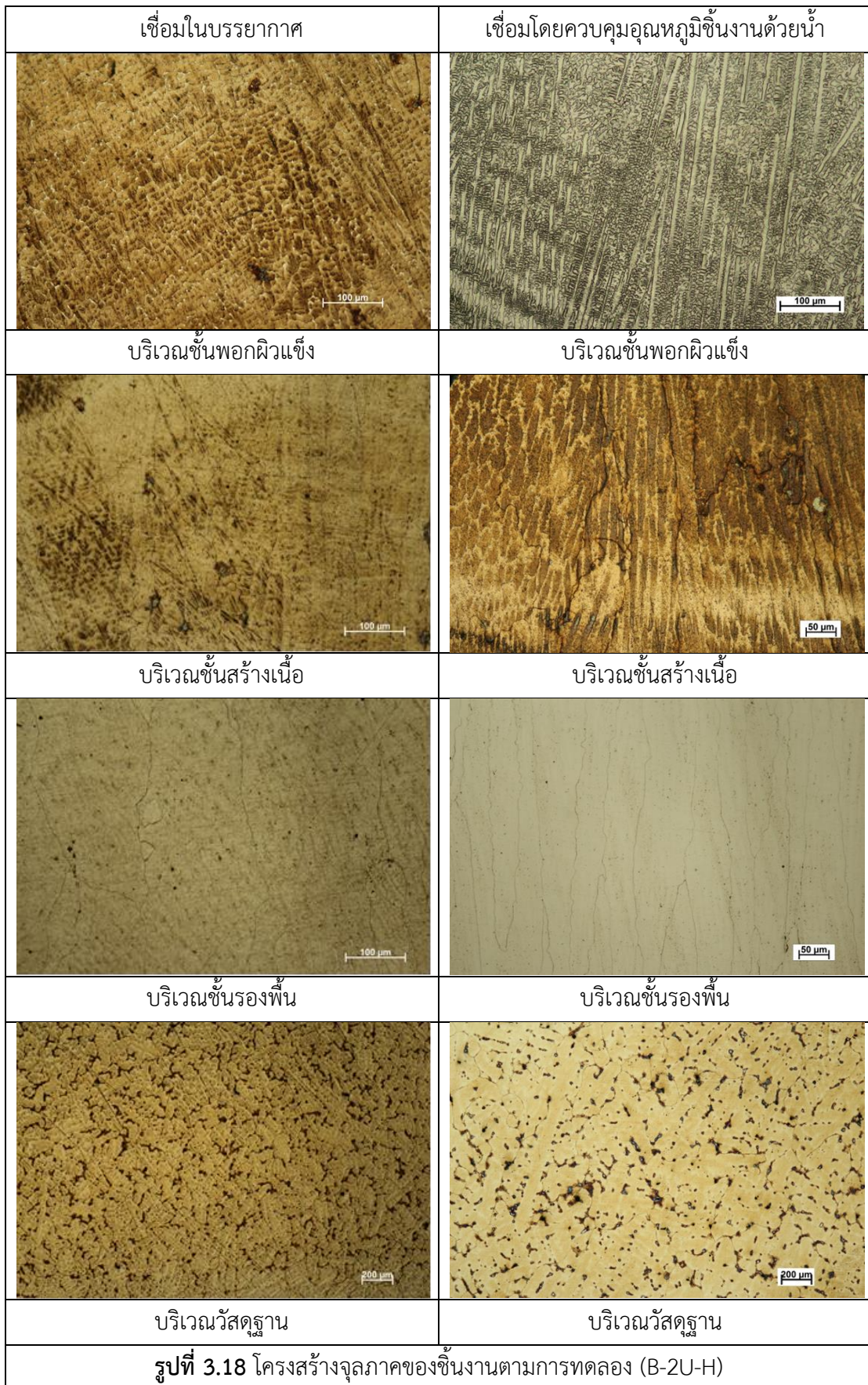
บรรยากาศ ทำให้ชั้นงานที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำหนการสึกหรอได้ดีกว่าชั้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศ แต่จะพบรอยแตกขนาดใหญ่ที่ผิวของชั้นงานที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ ทำให้มีการสูญเสียเนื้อโลหะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการตีกระแทก แต่ชั้นงานที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำหนการสึกหรอได้ดีกว่าชั้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศเนื่องจากโครงสร้างมาร์เทนไซต์ในชั้นพอกแข็งมีขนาดเกรนที่เล็กกว่า ปริมาณของแมงกานีสคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นบริเวณวัสดุฐานมีปริมาณใกล้เคียงกันทั้งชั้นงานที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำและเชื่อมในบรรยากาศ เนื่องจากความร้อนที่สะสมจากการเชื่อมยังไม่สูงมาก

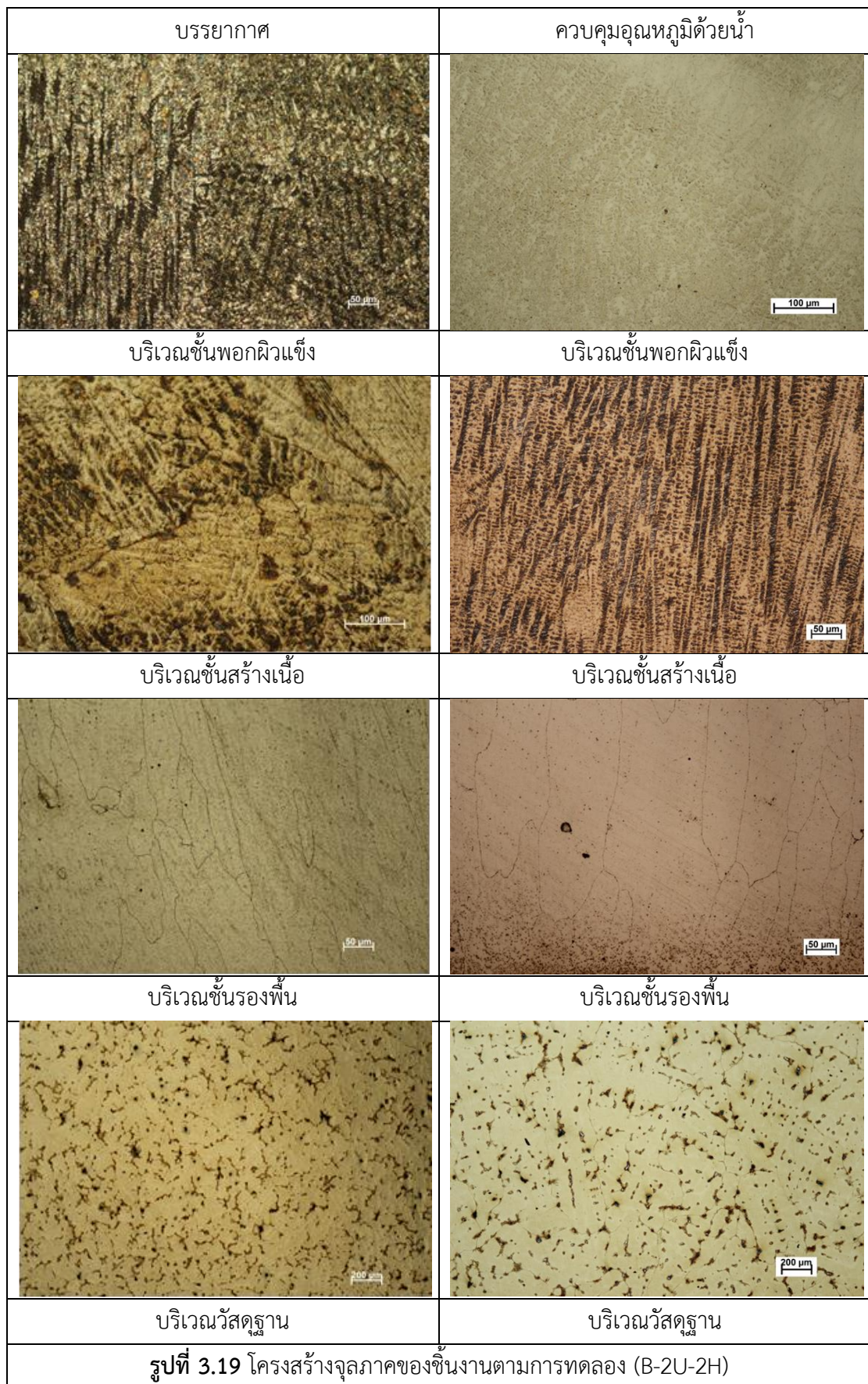
3.4 กรณีการเชื่อมโดยมีชั้นสร้างเนื้อ 2 ชั้น (B-2U-H และ B-2U-2H)

3.4.1 ผลวิเคราะห์ทางโลหะวิทยา

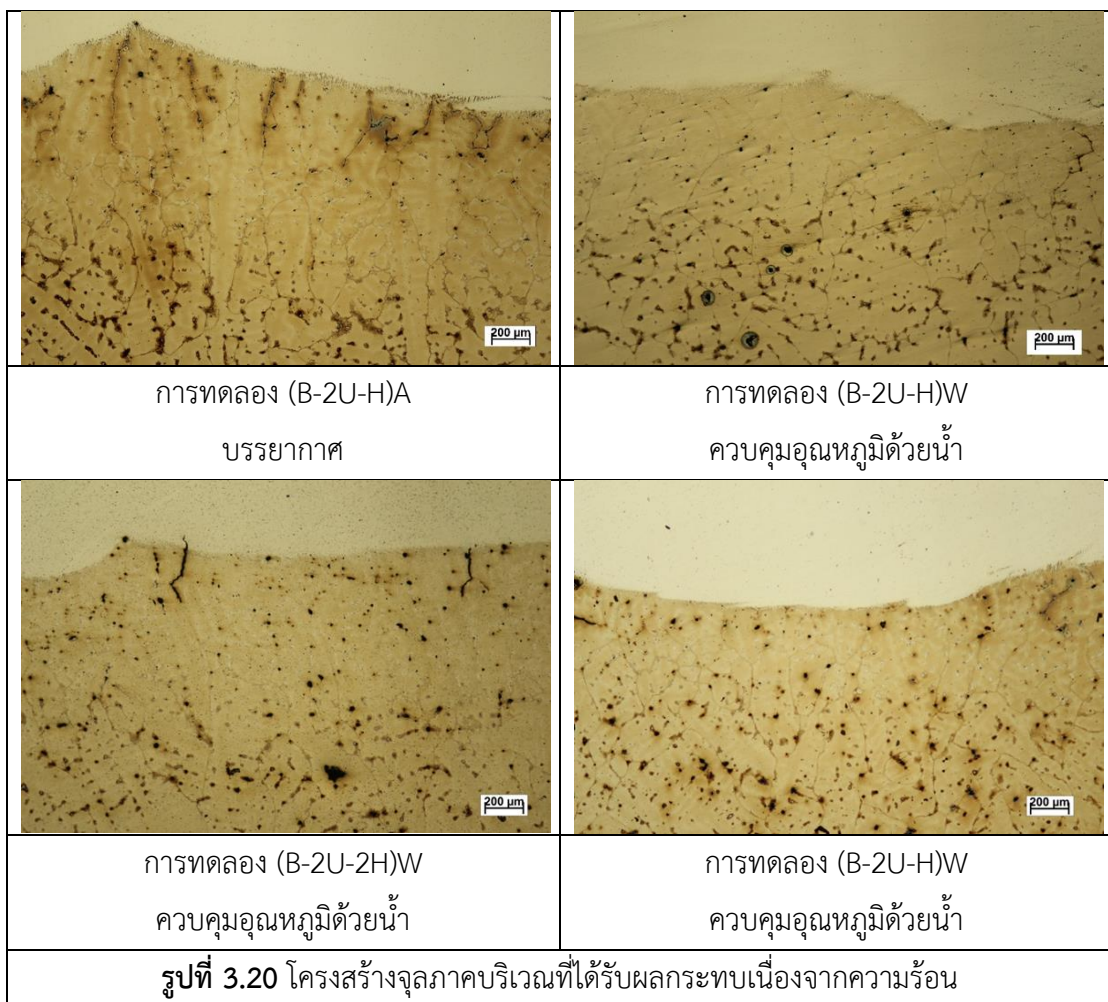
รูปที่ 3.17 แสดงโครงสร้างของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง โดยแสดงวัสดุฐาน ชั้นรองพื้น ชั้นสร้างเนื้อ และชั้นพอกแข็ง โดยในชั้นรองพื้นจะมีความหนาประมาณ 2-2.5 มิลลิเมตร ในชั้นสร้างเนื้อจะมีความหนาประมาณ 3.0-4.0 มิลลิเมตร และในชั้นพอกแข็งจะมีความหนาประมาณ 3.0-4.0 มิลลิเมตร





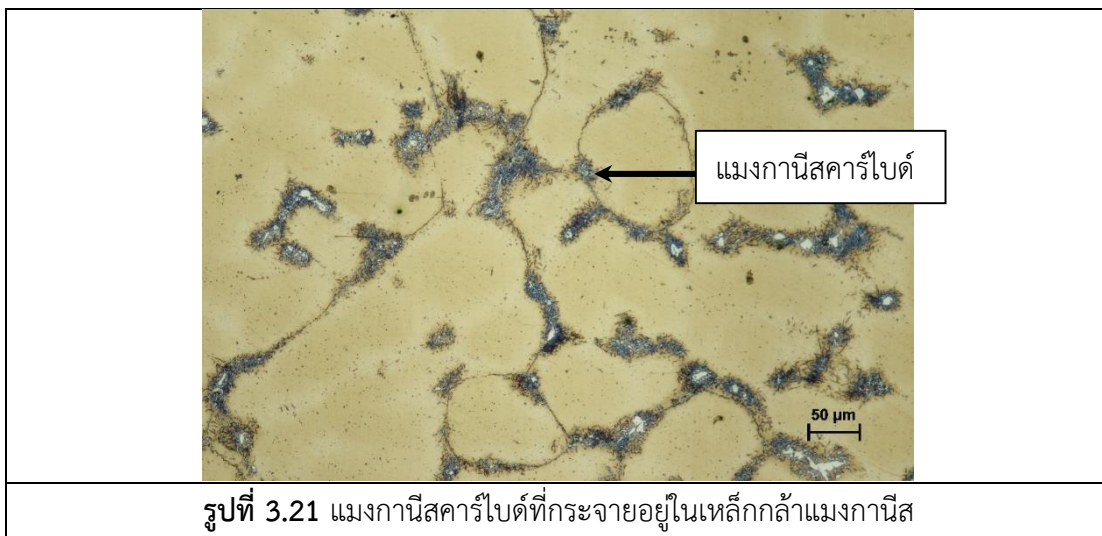


รูปที่ 3.18 และ รูปที่ 3.19 แสดงโครงสร้างจุลภาคในแต่ละเนื้อเชื่อม บริเวณเนื้อวัสดุฐานจะมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ โดยจะลักษณะเกรนเป็นเดนไดรต์ชัดเจน เนื่องจากวัสดุฐานเป็นชิ้นงานเตรียมมาจากการหล่อโลหะ ในชั้นรองพื้นและชั้นสร้างเนื้อจะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเดนไดรต์ โดยมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ แต่ในกรณีเชื่อมพอกแข็งสองชั้นจะมีการเงือจางจากผิวของชั้นพอกแข็งลงมาในชั้นสร้างเนื้อ โดยจะสังเกตเห็นได้ จะเห็นบริเวณที่มีสีเข้มแทรกอยู่ในเนื้อโครงสร้างออสเทนไนต์ ซึ่งมีสีอ่อนกว่า ในชั้นพอกผิวแข็งจะมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ แทรกอยู่ในออสเทนไนต์ โดยโครงสร้างออสเทนไนต์ จะมีสีอ่อนกว่าส่วนที่เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ในกรณี (B-2U-H) และ (B-2U-2H) นั้น เมื่อเทียบกับกรณี (B-U-H) และ (B-U-2H) ที่ชั้นพอกแข็งจะพบมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ น้อยกว่า เนื่องจากมีการเงือจางลงไปยังส่วนที่เป็นชั้นสร้างเนื้อ



รูปที่ 3.20 แสดงโครงสร้างบริเวณส่วนที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนจากการเชื่อม บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุฐานกับชั้นรองพื้น พบว่าในกรณีที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ จะพบบริเวณที่มีลักษณะเกรนหยาบ แคมกว่ากรณีที่เชื่อมในบรรยากาศ และกรณีที่มีจำนวนชั้นในการเชื่อมมากกว่าก็จะพบว่ามึบริเวณที่มีเกรนหยาบกว้างกว่ากรณีที่มีจำนวนชั้นในการเชื่อมน้อยกว่า

ในขณะที่บริเวณผลกระทบร้อนของชิ้นที่เชื่อมในบรรยากาศ พบว่าพบคาร์ไบด์ตามขอบเกรน และจากรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 ในรูปโครงสร้างที่ชั้นวัสดุฐาน พบว่าในชิ้นงานที่เชื่อมในอากาศจะพบมีการกระจายของคาร์ไบด์อยู่ทั่วไปบริเวณขอบเกรนในปริมาณที่มากกว่าชิ้นงานที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ โดยรูปของคาร์ไบด์อยู่ในรูปที่ 3.21 โดยปริมาณของคาร์ไบด์ที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุแสดงในตาราง 3.2 นอกจากนี้ในกรณีที่เชื่อมในบรรยากาศจะพบรอยแตกขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในบริเวณผลกระทบร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.20



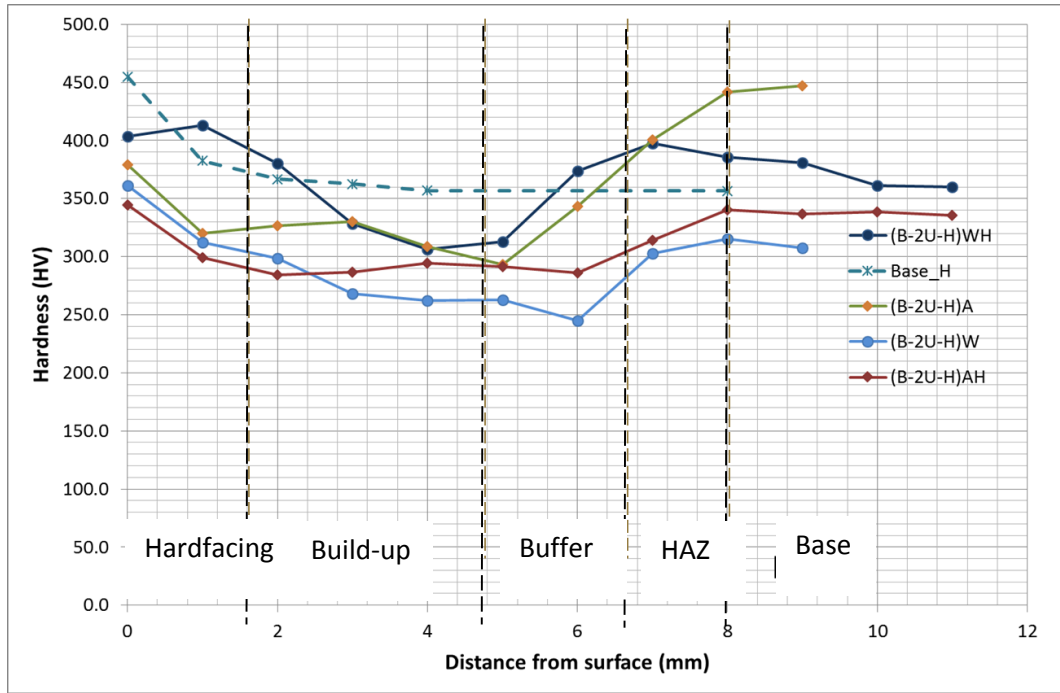
จากตารางที่ 3.2 ปริมาณของแมงกานีสคาร์ไบด์ที่บริเวณวัสดุฐานของกรณีที่เชื่อมในบรรยากาศจะมีปริมาณของแมงกานีสคาร์ไบด์มากกว่า กรณีที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ

ตารางที่ 3.2 ปริมาณแมงกานีสคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นบริเวณวัสดุฐาน

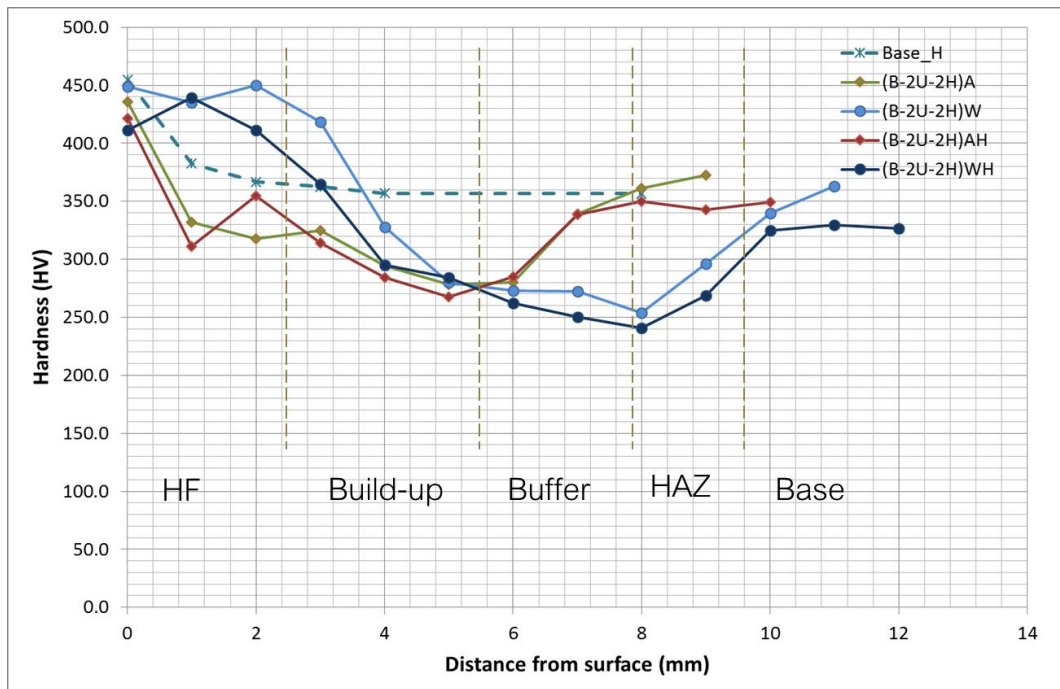
ตัวอย่าง	ปริมาณแมงกานีสคาร์ไบด์ (% พื้นที่)
(B-2U-H)A บรรยากาศ	15.6
(B-2U-H)W น้ำ	9.9
(B-2U-2H)A บรรยากาศ	11.1
(B-2U-2H)W น้ำ	8.0

3.4.2 ค่าความแข็ง

รูปที่ 3.22 และรูปที่ 3.23 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงาน โดยวัดความแข็งจากผิวหน้าชิ้นงานลงไปตามความลึกผ่านชั้นเชื่อมต่างๆ ผลการทดสอบความแข็ง ชิ้นงานที่เชื่อมพอกผิวแข็ง 1 ชั้นให้ความแข็งที่ผิว 350-400 HV ชิ้นงานที่เชื่อมพอกผิวแข็ง 2 ชั้น ให้ความแข็งที่ผิว 400-450 HV



รูปที่ 3.22 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่เชื่อมชั้นสร้างเนื้อ 2 ชั้น พอกแข็ง 1 ชั้น






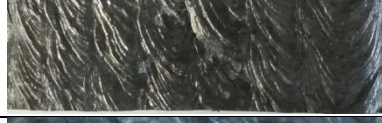




รูปที่ 3.23 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่เชื่อมชั้นสร้างเนื้อ 2 ชั้น พอกแข็ง 2 ชั้น


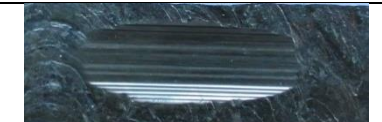

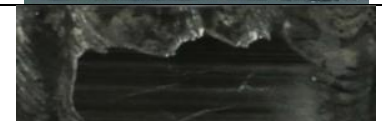




โดยชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอกผิวแข็ง 2 ชั้นให้ความแข็งที่ใกล้เคียงกับเหล็กกล้าแมงกานีสที่ผ่านการตีกระแทก โดยบริเวณที่มีความแข็งต่ำสุดเป็นบริเวณที่เป็นชั้นรองพื้น (ความลึกจากผิว 4-6 มิลลิเมตร) จะพบว่าความแข็งที่บริเวณชั้นพอกแข็งลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นสร้างเนื้อ

เนื่องจากเมื่อมีชั้นสร้างเนื้อเพิ่มขึ้น ทำให้มีการเจือจาง ของชั้นพอกแข็งลงไปสู่ชั้นสร้างเนื้อมากขึ้น ดูได้จากโครงสร้างจุลภาคที่ชั้นสร้างเนื้อจะมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ สีเข้มแทรกลงมามากกว่า ที่ชั้นวัสดุฐานจะมีความแข็งสูงกว่าเหล็กกล้าแมงกานีสที่ยังไม่ผ่านการเชื่อม (230 HV) ความแข็งในชั้นสร้างเนื้อจะมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากจำนวนชั้นที่เพิ่มมากขึ้นทำให้การตีกระแทกไม่สามารถทำให้เกิดเวิร์คฮาร์ดเดนนิ่งในเนื้อเชื่อมที่สึกลงมาจากผิวหน้ามากขึ้นได้

3.4.3 การทดสอบการสึกหรอ

ตัวอย่าง	ก่อนการตีกระแทก	หลังการตีกระแทก
(B-2U-H)A บรรยากาศ		
(B-2U-H)W น้ำ		
(B-2U-2H)A บรรยากาศ		
(B-2U-2H)W น้ำ		

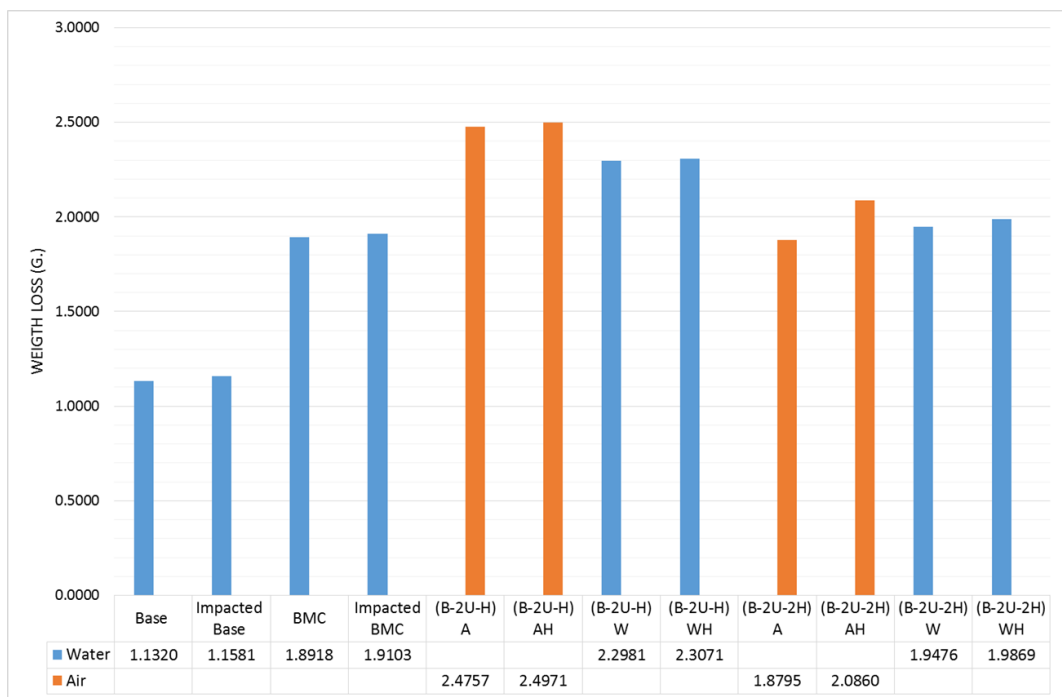
รูปที่ 3.24 สภาพผิวหน้าชิ้นงานก่อนและหลังตีกระแทก ก่อนการทดสอบการสึกหรอ

ตัวอย่าง	ก่อนการตีกระแทก	หลังการตีกระแทก
(B-2U-H)A บรรยากาศ		
(B-2U-H)W น้ำ		
(B-2U-2H)A บรรยากาศ		
(B-2U-2H)W น้ำ		

รูปที่ 3.25 สภาพผิวหน้าชิ้นงานก่อนและหลังตีกระแทก หลังการทดสอบการสึกหรอ

สภาพผิวหน้าของชิ้นงานก่อนและหลังตีกระแทกแสดงในรูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.25 แสดงผิวหน้าของชิ้นงานภายหลังการทดสอบการสึกหรอ โดยสภาพทั่วไปภายหลังการเชื่อมไม่พบรอยแตกให้เห็นในทุกเงื่อนไขการเชื่อม แต่หลังจากไปทำการทดสอบตีกระแทก ชิ้นงานทุกชิ้น พบรอยแตกขนาดใหญ่ที่บริเวณผิวหน้าชิ้นงานในทุกเงื่อนไขการเชื่อม

รูปที่ 3.26 แสดงผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่เชื่อมชั้นสร้างเนื้อ 2 ชั้น โดยชิ้นงาน B-2U-2H ที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ ทนการสึกหรอได้ดี โดยมีน้ำหนักที่หายไป 1.9476 กรัม (ก่อนการตีกระแทก) และหลังตีกระแทกมีน้ำหนักที่หายไป 1.9869 กรัม โดยชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศ จะทนการสึกหรอได้น้อยกว่า ชิ้นงานที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ และชิ้นงานที่ผ่านการตีกระแทกแล้ว จะทนการสึกหรอได้น้อยกว่า ชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการตีกระแทก เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการตีกระแทกได้เกิดรอยแตกที่ผิวหน้าชิ้นงาน ทำให้ทรายที่ใช้ในการทดสอบสารรถแทรกเข้าไปในรอยแตกทำให้เกิดการเสียดสี เสียเนื้อโลหะไปมากกว่า ชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการตีกระแทก



รูปที่ 3.26 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่เชื่อมพอกชั้นสร้างเนื้อ 2 ชั้น

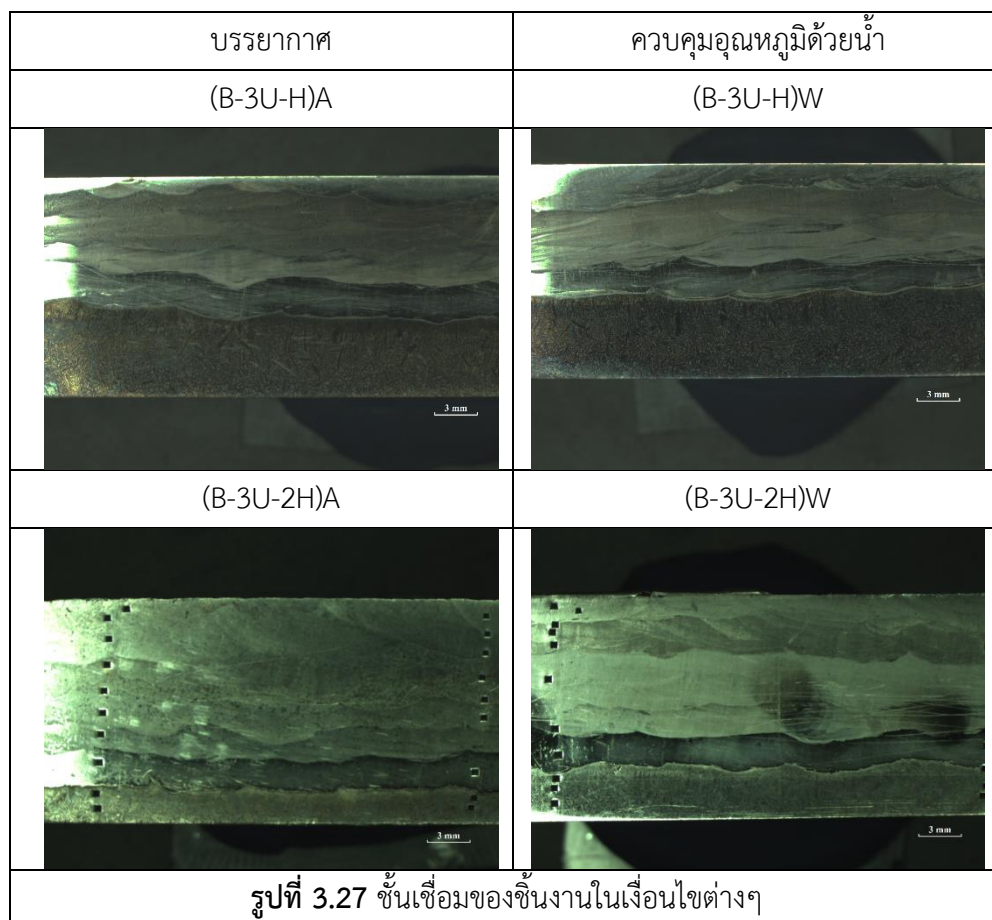
จากภาพถ่ายโครงสร้างมหภาคไม่พบรอยแตกในทุกเงื่อนไขการเชื่อม แต่ในโครงสร้างจุลภาคพบรอยแตกขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในบริเวณผลกระทบร้อน สำหรับชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศ เนื่องมาจากการมีแมงกานีสคาร์ไบด์เกิดขึ้นเนื่องจากไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ ดังจะเห็นได้จากปริมาณของพื้นที่แมงกานีสคาร์ไบด์ในวัสดุฐานที่มีปริมาณมากกว่า

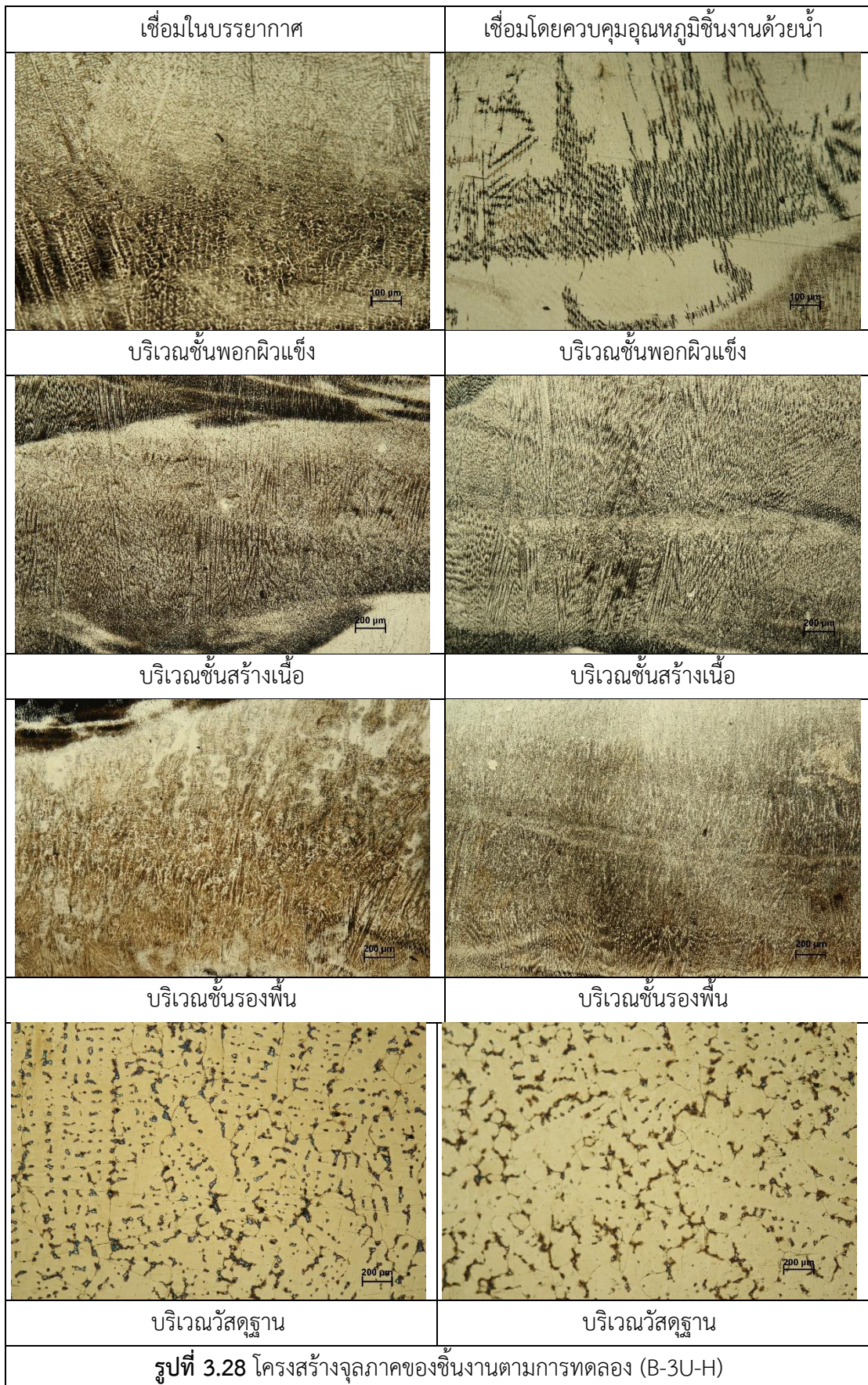
ในการเพิ่มชั้นสร้างเนื้อเพิ่มขึ้นมาทำให้ความแข็งของชั้นพอกแข็งลดลงเนื่องจากการเจือจางเพิ่มมากขึ้น โดยดูได้จากโครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็ง ที่ลักษณะของมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นจะไม่มีลักษณะเรียวยแหลม เหมือนกรณีการเชื่อมชั้นสร้างเนื้อ 1 ชั้น ทำให้ค่าความแข็งของชั้นพอกแข็งลดลง เป็นผลให้ทนการสึกหรอได้น้อยลง ดูได้จากผลการทดสอบการสึกหรอ โดยกรณีเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น ทนการสึกหรอได้ดีกว่าเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคชั้นพอกแข็งที่มีการเจือจางน้อยกว่า และการเชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำทนการสึกหรอได้ดีกว่าการเชื่อมในบรรยากาศเนื่องจากลักษณะเกรนของชั้นพอกแข็งมีลักษณะเป็นเกรนละเอียดมากกว่าเกรนของชั้นพอกแข็งที่เชื่อมในบรรยากาศ

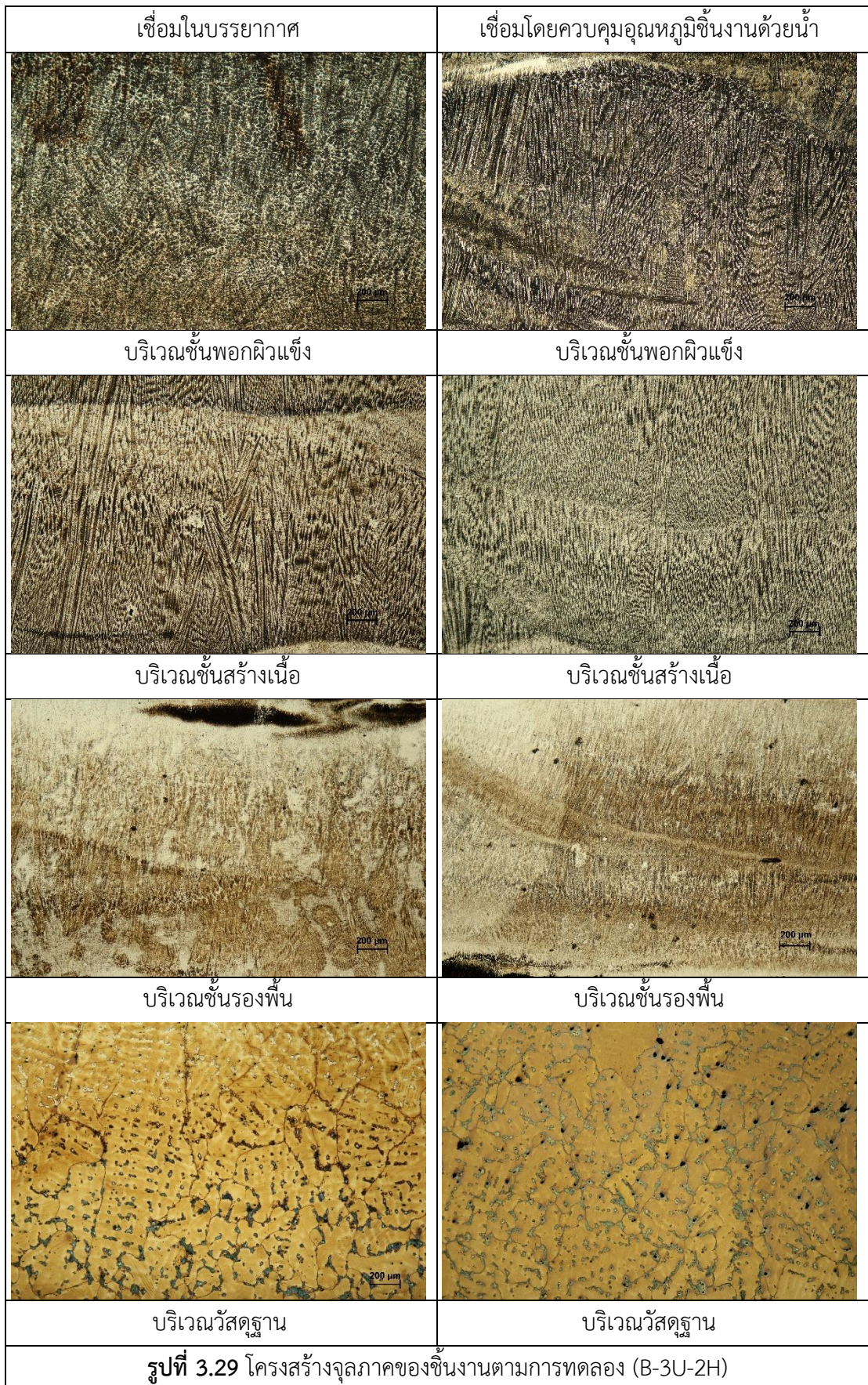
3.5 กรณีการเชื่อมชั้นสร้างเนื้อ 3 ชั้น (B-3U-H และ B-3U-2H)

3.5.1 ผลวิเคราะห์ทางโลหะวิทยา

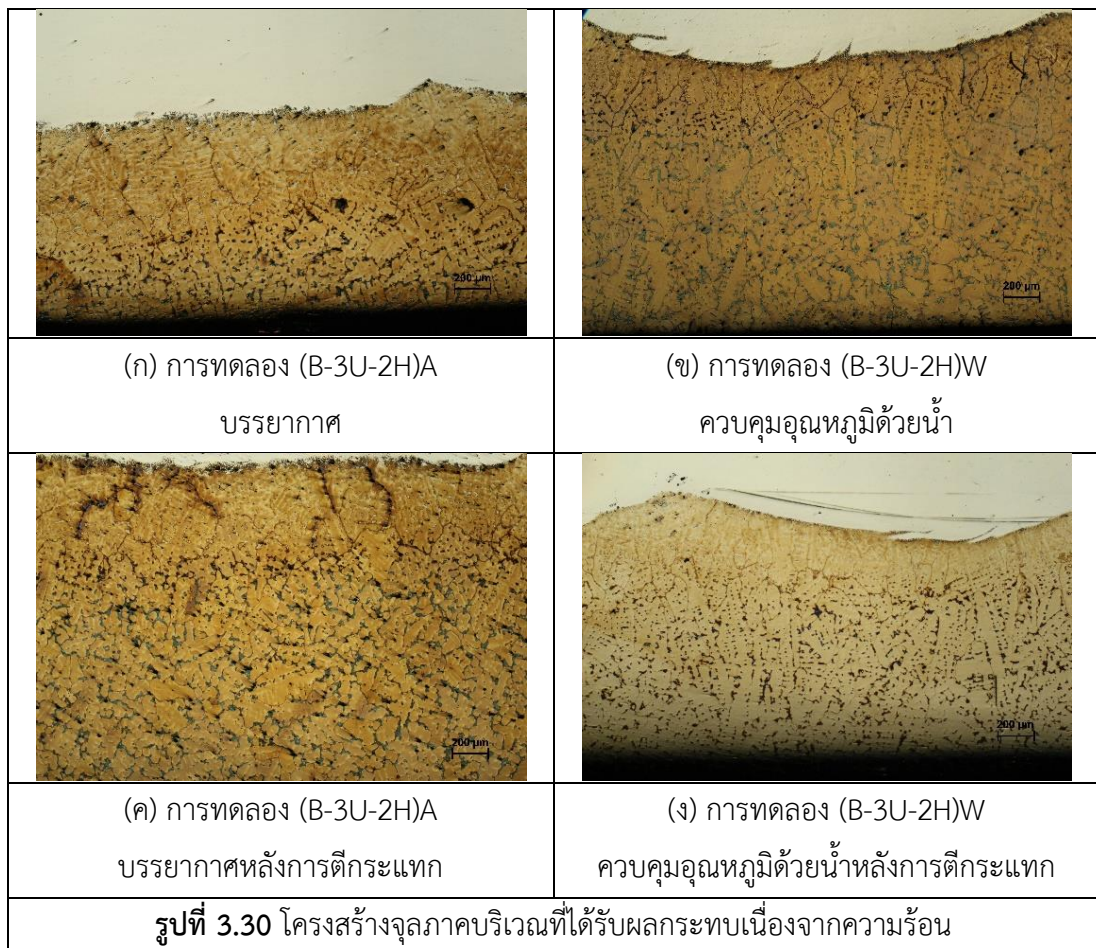
รูปที่ 3.27 แสดงโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง โดยแสดงชั้น วัสดุฐาน, ชั้นรองพื้น, ชั้นสร้างเนื้อ, และชั้นพอกแข็ง โดยชั้นพอกแข็งหนา 1-1.5 มม. ในกรณีที่เชื่อมชั้นพอกแข็ง 1 ชั้น และหนา 2-2.5 มม. ในกรณีที่เชื่อมชั้นพอกแข็ง 2 ชั้น ชั้นสร้างเนื้อหนา 6-7 มม. และชั้นรองพื้นหนา 2-2.5 มม. โดยจากการสังเกต ไม่พบรอยแตกภายในเนื้อเชื่อมในทุกกรณี







รูปที่ 3.28 และรูปที่ 3.29 แสดงโครงสร้างจุลภาคในแต่ละเนื้อเชื่อม บริเวณเนื้อวัสดุฐานจะมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ โดยจะลักษณะเกรนเป็นเดนไดรต์ชัดเจน เนื่องจากวัสดุฐานเป็นชิ้นงานเตรียมมาจากการหล่อโลหะ พบแมงกานีสคาร์ไบด์แทรกอยู่ตามขอบเกรนมากขึ้น ในชั้นรองพื้นและชั้นสร้างเนื้อจะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเดนไดรต์ โดยมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ แต่ในกรณีเชื่อมพอกแข็งสองชั้นจะมีการเจือจาง จากผิวของชั้นพอกแข็งลงมาในชั้นสร้างเนื้อ โดยจะสังเกตได้จะเห็นบริเวณที่มีสีเข้มแทรกอยู่ในเนื้อโครงสร้างออสเทนไนต์ ซึ่งมีสีอ่อนกว่า ในชั้นพอกผิวแข็งจะมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ แทรกอยู่ในออสเทนไนต์ โดยโครงสร้างออสเทนไนต์ จะมีสีอ่อนกว่าส่วนที่เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ในกรณี (B-2U-H) และ (B-2U-2H) นั้น เมื่อเทียบกับกรณี (B-U-H) และ (B-U-2H) ที่ชั้นพอกแข็งจะพบมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ น้อยกว่า เนื่องจากมีการเจือจาง ลงไปยังส่วนที่เป็นชั้นสร้างเนื้อ และในกรณีที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำโครงสร้างมาร์เทนไซต์ของชั้นพอกแข็งจะมีลักษณะเรียวยาวแหลมกว่า ในกรณีที่เชื่อมในบรรยากาศ



รูปที่ 3.30 แสดงโครงสร้างบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อน พบว่าชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศจะมีความกว้างของบริเวณผลกระทบร้อน มากกว่าชิ้นงานที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ (ดังรูป 3.30 ก และ ข) โดยในชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศพบรอยแตกขนาด

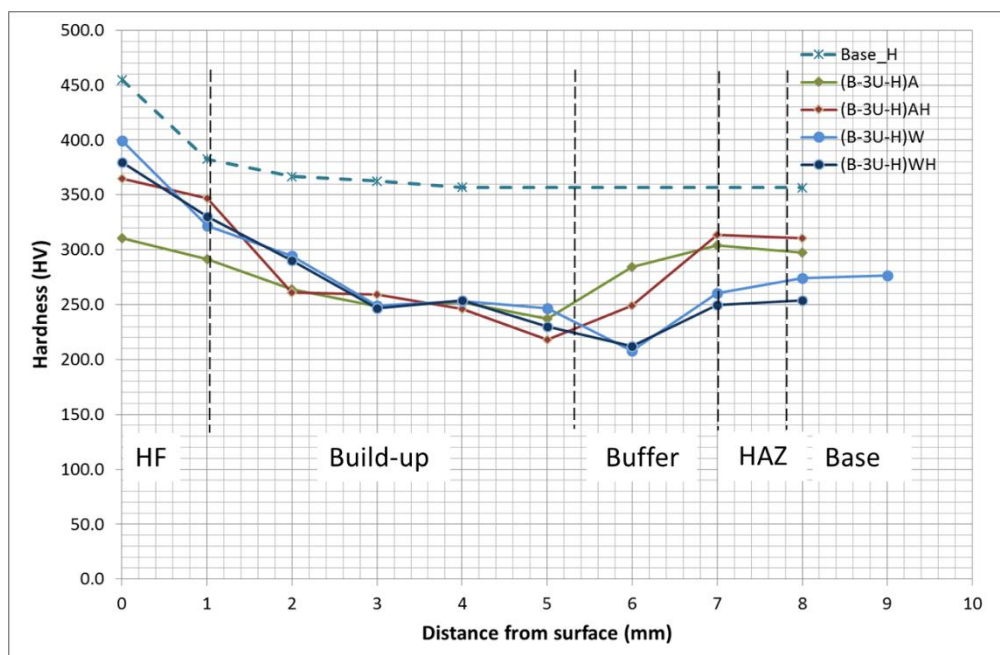
เล็กในโซนผลกระทบร้อนเล็กน้อย เมื่อผ่านการตีกระทบว่าชิ้นงานที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำไม่พบรอยแตกในชั้นผลกระทบร้อน (ดังรูป 3.30 ง) แต่ในชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศพบบรอยแตกในชั้นผลกระทบร้อนเพิ่มมากขึ้น (ดังรูป 3.30 ค) เนื่องมาจากการเกิดแมงกานีสคาร์ไบด์ไปสะสมอยู่ตามขอบเกรน ทำให้เมื่อรับแรงกระทบจึงเกิดการแตกร้าว แสดงในตาราง 3.3 ชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศมีปริมาณของคาร์ไบด์ที่มากกว่าชิ้นงานที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ

ตารางที่ 3.3 ปริมาณแมงกานีสคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นบริเวณวัสดุฐาน

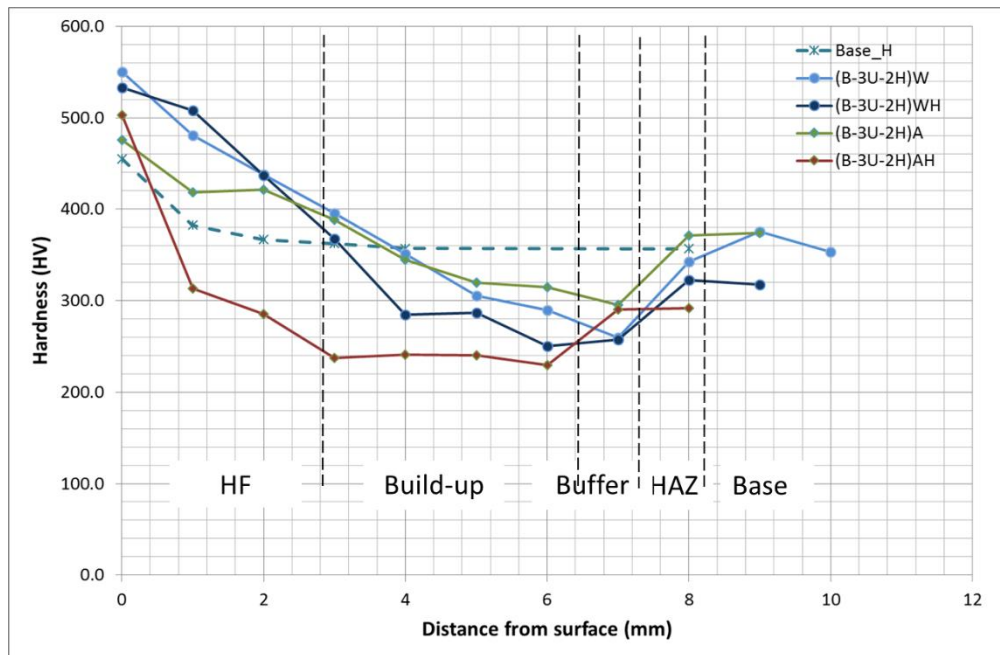
ตัวอย่าง	ปริมาณแมงกานีสคาร์ไบด์ (% พื้นที่)
(B-3U-H)A บรรยากาศ	13.9
(B-3U-H)W น้ำ	13.3
(B-3U-2H)A บรรยากาศ	20.5
(B-3U-2H)W น้ำ	19.0

3.5.2 ค่าความแข็ง

รูปที่ 3.31 และรูปที่ 3.32 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงาน โดยวัดความแข็งจากผิวหน้าชิ้นงานลงไปตามความลึกผ่านชั้นเชื่อมต่างๆ ผลการทดสอบความแข็ง ชิ้นงานที่เชื่อมพอกผิวแข็ง 1 ชั้นให้ความแข็งที่ผิว 320-400 HV ชิ้นงานที่เชื่อมพอกผิวแข็ง 2 ชั้น ให้ความแข็งที่ผิว 450-550 HV



รูปที่ 3.31 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่เชื่อมชั้นสร้างเนื้อ 3 ชั้น พอกแข็ง 1 ชั้น


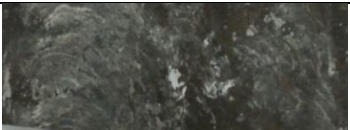





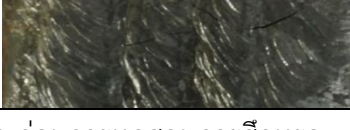


รูปที่ 3.32 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่เชื่อมชั้นสร้างเนื้อ 3 ชั้น พอกแข็ง 2 ชั้น









โดยชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอกผิวแข็ง 2 ชั้นให้ความแข็งที่สูงกว่าเหล็กกล้าแมงกานีสที่ผ่านการตีกระแทก โดยบริเวณที่มีความแข็งต่ำสุดเป็นบริเวณที่เป็นชั้นรองพื้น (ความลึกจากผิว 6-7 มิลลิเมตร) ความแข็งในชั้นสร้างเนื้อในกรณีที่เชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นมีค่าประมาณ 250 HV ในขณะที่ในกรณีเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น มีความแข็งในชั้นสร้างเนื้อประมาณ 300 HV เนื่องจากการพอกแข็ง 2 ชั้นทำให้มีการเจือจางมาจากผิวพอกแข็งมากกว่า เป็นผลให้ความแข็งในชั้นสร้างเนื้อสูงขึ้น ความแข็งในชั้นรองพื้นของชิ้นงานที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ ต่ำกว่าชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศ ทั้งกรณีสองกรณี

3.5.3 การทดสอบการสึกหรอ

สภาพผิวหน้าของชิ้นงานก่อนและหลังตีกระแทกแสดงในรูปที่ 3.33 และรูปที่ 3.34 แสดงผิวหน้าของชิ้นงานภายหลังการทดสอบการสึกหรอ โดยสภาพทั่วไปภายหลังการเชื่อมไม่พบรอยแตกให้เห็นในทุกเงื่อนไขการเชื่อม แต่หลังจากไปทำการทดสอบตีกระแทก ชิ้นงานทุกชิ้น พบรอยแตกที่บริเวณผิวหน้าชิ้นงานในทุกเงื่อนไขการเชื่อม ที่เงื่อนไข B-3U-2H เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ พบรอยแตกขนาดใหญ่

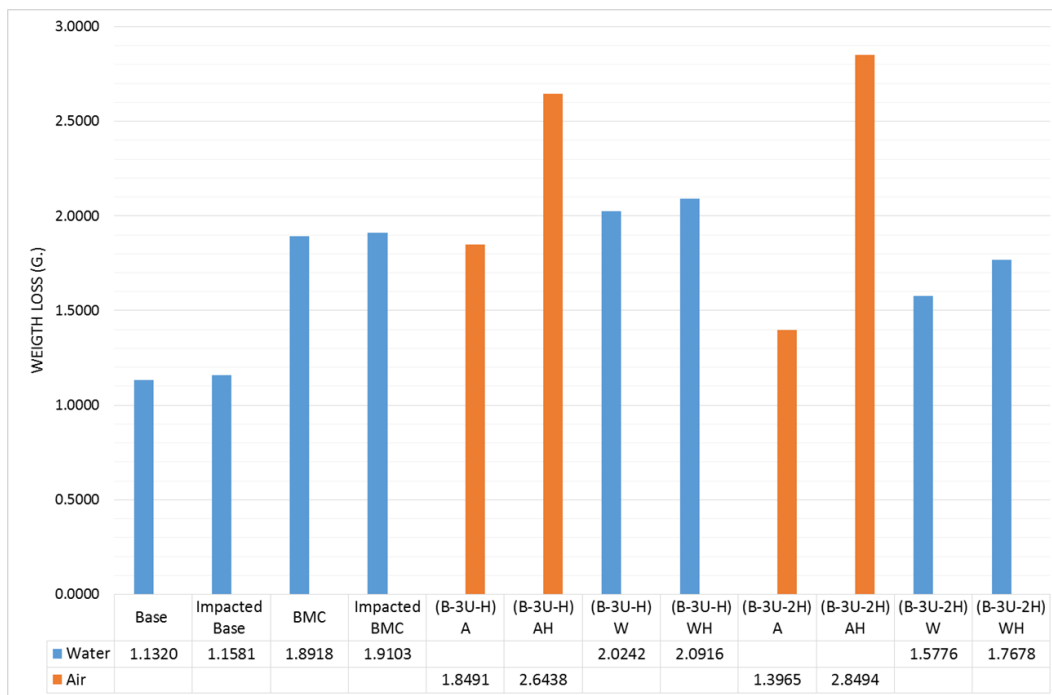
ตัวอย่าง	ก่อนการตีกระแทก	หลังการตีกระแทก
(B-3U-H)A บรรยากาศ		
(B-3U-H)W น้ำ		
(B-3U-2H)A บรรยากาศ		
(B-3U-2H)W น้ำ		

รูปที่ 3.33 สภาพผิวหน้าชิ้นงานก่อนและหลังตีกระแทก ก่อนการทดสอบการสึกหรอ

ตัวอย่าง	ก่อนการตีกระแทก	หลังการตีกระแทก
(B-3U-H)A บรรยากาศ		
(B-3U-H)W น้ำ		
(B-3U-2H)A บรรยากาศ		
(B-3U-2H)W น้ำ		

รูปที่ 3.34 สภาพผิวหน้าชิ้นงานก่อนและหลังตีกระแทก หลังการทดสอบการสึกหรอ

รูปที่ 3.35 แสดงผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่เชื่อมพอกชั้นสร้างเนื้อ 3 ชั้น โดยชิ้นงาน B-3U-2H ที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำทนการสึกหรอได้ดีที่สุดทั้งก่อนและหลังการตีกระแทก มีน้ำหนักที่หายไป 1.5776 กรัมก่อนการตีกระแทก และ 1.7678 กรัม หลังการตีกระแทก ชิ้นงาน B-3U-2H ที่เชื่อมในบรรยากาศ ถึงแม้จะทนการสึกหรอได้ดีก่อนการตีกระแทก (น้ำหนักที่หายไป 1.3965 กรัม) แต่เมื่อได้รับการตีกระแทกกลับพบว่าน้ำหนักที่หายไปสูงถึง 2.8494 กรัม



รูปที่ 3.35 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่เชื่อมพอกชั้นสร้างเนื้อ 3 ชั้น

จากภาพถ่ายโครงสร้างมหภาคชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมโดยมีชั้นพอกแข็ง 3 ชั้นนั้น ไม่พบรอยแตกในเนื้อเชื่อม แต่เมื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคกลับพบรอยแตกขนาดเล็กอยู่บ้างในโซนผลกระทบเนื่องจากความร้อน ของชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศ โดยชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศจะพบมากกว่าชิ้นงานที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ และเมื่อได้รับการตีกระทบว่าบริเวณผลกระทบร้อนของชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศพบรอยแตกมากขึ้น ซึ่งเมื่อดูจากค่าความแข็งก็จะพบว่าบริเวณผลกระทบร้อนของชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศจะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าชิ้นงานที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ ประกอบกับมีรอยแตกขนาดเล็กอยู่ตั้งแต่หลังการเชื่อม ทำให้เมื่อได้รับแรงกระทบจึงมีรอยแตกในบริเวณผลกระทบร้อนเพิ่มขึ้น

ในชิ้นงานที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำถึงแม้เมื่อตีกระทบแล้วจะพบรอยแตกที่ผิวหน้าชิ้นงาน แต่เมื่อดูโครงสร้างจุลภาคกลับไม่พบรอยแตกระหว่างชั้นเชื่อมและในบริเวณผลกระทบร้อน ผลการทดสอบการสึกหรอได้น้ำหนักที่หายไปน้อยกว่าชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดสร้างเนื้อเพียงอย่างเดียว

3.6 วิจัยรณผลการทดลอง

จากการทดลองในทุกเงื่อนไขที่ได้ทำการทดลอง ในชั้นวัสดุฐานที่เป็นเหล็กกล้าแมงกานีส หากมีจำนวนชั้นเชื่อมที่เพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้บริเวณเนื้อวัสดุเดิมมีการสะสมความร้อนมาก

ขึ้นทำให้มีแมงกานีสคาร์ไบด์เกิดมากขึ้นเมื่อจำนวนชั้นที่เชื่อมเพิ่มมากขึ้น การควบคุมอุณหภูมิการเชื่อมด้วยน้ำช่วยลดการเพิ่มของปริมาณแมงกานีสคาร์ไบด์ลงได้

บริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนนั้นในทุกกรณี การเชื่อมในบรรยากาศจะทำให้ได้บริเวณผลกระทบที่กว้างและมีเกรนที่หยาบกว่าการเชื่อมที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ ขนาดเกรนที่หยาบกว่า เมื่อได้รับแรงกระแทกก็จะมีรอยแตกขนาดเล็กเกิดขึ้นในบริเวณผลกระทบร้อนได้ ในกรณีที่เชื่อมสร้างเนื้อ 2 ชั้น (B-2U-2H) ที่เชื่อมในบรรยากาศและเชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ พบว่ามีรอยแตกขนาดเล็กบริเวณผลกระทบร้อนเพิ่มขึ้นหลังขึ้นงานได้รับการตีกระแทก แต่ในกรณีที่เชื่อมสร้างเนื้อ 3 ชั้น (B-3U-2H) พบว่ารอยแตกขนาดเล็กจะเพิ่มขึ้นหลังขึ้นงานได้รับแรงกระแทกเฉพาะกรณีที่เชื่อมในบรรยากาศเท่านั้น ในกรณีที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ ไม่พบรอยแตกในชั้นผลกระทบร้อนเนื่องจาก ขนาดเกรนที่ละเอียดกว่า ปริมาณของแมงกานีสคาร์ไบด์ที่น้อยกว่า และมีจำนวนชั้นสร้างเนื้อมากขึ้นมาช่วยกระจายพลังงานที่เกิดจากการตีกระแทก

บริเวณชั้นสร้างเนื้อ บริเวณที่ติดกับชั้นพอกแข็งจะมีความแข็งแรงสูงกว่าบริเวณที่ติดกับชั้นรองพื้น เนื่องจากเกิดการเงื้องาจาง จากชั้นพอกแข็งด้านบน โดยดูได้จากโครงสร้างจุลภาคจะมีชั้นของมาร์เทนไซต์แทรกอยู่ในเนื้อของออสเทนไนต์ ในขณะที่บริเวณที่ติดกับชั้นรองพื้นจะมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ โดยเมื่อมีจำนวนชั้นรองพื้น 2 และ 3 ชั้น พบว่าความแข็งแรงของชั้นรองพื้นจะไม่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อได้รับการตีกระแทก

บริเวณชั้นพอกแข็ง การเชื่อมชั้นพอกแข็ง 2 ชั้น ให้ความแข็งแรงที่สูงกว่าการเชื่อมชั้นพอกแข็งเพียงชั้นเดียว เนื่องจากการเชื่อมชั้นพอกแข็ง 1 ชั้น จะเกิดการเงื้องาจาง จากชั้นสร้างเนื้อ ทำให้ไม่ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่ต้องการ ในขณะที่การเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น ทำให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มากขึ้น ดูได้จากโครงสร้างจุลภาคที่จะมีปริมาณโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่เป็นสี่เหลี่ยมกระจายอยู่ในเนื้อโครงสร้างออสเทนไนต์มากกว่า โดยการเชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำนั้นจะทำให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่เรียวยาวแหลม และมีขนาดเล็กกว่าการเชื่อมในบรรยากาศ เนื่องจากอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานที่เชื่อมในน้ำนั้นสูงกว่าที่เชื่อมในบรรยากาศ แต่เมื่อได้รับการตีกระแทกชิ้นงานที่เชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น ซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่าก็จะพบรอยแตกที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานมากกว่า ชิ้นงานที่เชื่อมพอกแข็งเพียง 1 ชั้น

ผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอกแข็งนั้น ความแข็งแรงในชั้นพอกแข็งจะสูงที่สุด ของชั้นรองพื้นจะต่ำที่สุด ความแข็งแรงของชั้นสร้างเนื้อและวัสดุฐานมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าความแข็งแรงก่อนและหลังการตีกระแทก ไม่ค่อยแตกต่างกันในกรณีเดียวกัน ยกเว้นในกรณีที่มีการเชื่อมสร้างเนื้อเพียงชั้นเดียว ค่าความแข็งแรงในชั้นสร้างเนื้อเพิ่มขึ้นหลังการตีกระแทก แต่เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นสร้างเนื้อมากขึ้นการตีกระแทกไม่ค่อยมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงในชั้นสร้างเนื้อ

ผลการทดสอบการสึกหรอ ในเหล็กกล้าแมงกานีส ผลการสึกหรอในชิ้นงานก่อนและหลังการตีกระแทกให้ผลการสึกหรอใกล้เคียงกัน คือมีน้ำหนักที่หายไป 1.1320 กรัม ก่อนการตี

กระแทก และ 1.1581 กรัม หลังการตีกระแทก ในชิ้นงานที่เชื่อมด้วยชั้นสร้างเนื้อเพียงอย่างเดียว (เชื่อม 3 ชั้น ควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ) เมื่อนำมาทดสอบการสึกหรอ ให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกัน ทั้งก่อนและหลังการตีกระแทก คือ มีน้ำหนักที่หายไป 1.8918 กรัม ก่อนการตีกระแทก และ 1.9103 กรัม หลังการตีกระแทก โดยสาเหตุที่ทำให้การสึกหรอภายหลังการตีกระแทกมีค่าใกล้เคียงกันนั้น จากการศึกษาของ Weilin Yan และคณะ [13] พบว่าการใช้โพลดในการกระแทกสูงนั้นเพิ่มความแข็งแกร่งให้กับผิวหน้าของเหล็กกล้าแมงกานีส แต่จะไม่เพิ่มการทนการสึกหรอ เพราะโพลดในการกระแทกที่สูงนั้นเหนียวทำให้เกิด รอยแตกขนาดเล็ก (Microcrack) ที่ได้ผิวหน้าของชิ้นงาน

ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่เชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น (B-U-H B-2U-H B-3U-H) นั้นปรากฏว่าผลการทดสอบการสึกหรอมีน้ำหนักที่หายไปสูงกว่า ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยชั้นสร้างเนื้อเพียงอย่างเดียว โดยส่วนใหญ่มีน้ำหนักที่หายไปเกิน 2 กรัม ทั้งการเชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ และการเชื่อมในบรรยากาศ

ในขณะที่ชิ้นงานที่เชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น (B-U-2H B-2U-2H B-3U-2H) ในชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศ ก่อนการตีกระแทกมีน้ำหนักที่หายไป 2.0265 กรัม (B-U-2H) 1.8795 กรัม (B-2U-2H) และ 1.3965 กรัม (B-3U-2H) ซึ่งเฉลี่ยแล้วใกล้เคียงกับชิ้นงานที่เชื่อมโดยชั้นสร้างเนื้อเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อได้รับการตีกระแทกแล้วปรากฏว่ามีน้ำหนักที่หายไปสูงกว่า 2 กรัม ทั้ง 3 กรณี ในขณะที่ชิ้นงานที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำนั้นน้ำหนักที่หายไปน้อยกว่า ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยชั้นสร้างเนื้อเพียงอย่างเดียว คือ 1.5933 กรัม (B-U-2H) และ 1.5776 กรัม (B-3U-2H) ส่วนในกรณี B-2U-2H นั้นก็มีน้ำหนักที่หายไป 1.8795 กรัม ซึ่งใกล้เคียงกับชิ้นงานที่เชื่อมโดยชั้นสร้างเนื้อเพียงอย่างเดียว ค่าความต้านทานการสึกหรอของผิวพอกแข็งที่ต่ำกว่าที่ควรจะเป็นนั้นเนื่องมาจากชิ้นงานที่ใช้เตรียมโครงสร้างนั้นเป็นชิ้นงานที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการซึ่งมีขนาดเล็ก เหล็กกล้าแมงกานีสนั้นมีสมบัติการถ่ายเทความร้อนสู่สภาพแวดล้อมไม่ดี ทำให้มีความร้อนสะสมอยู่ในชิ้นงานมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มจำนวนชั้นในการเชื่อมมากขึ้น ชั้นพอกผิวแข็งเป็นชั้นเชื่อมที่ต้องการอัตราการเย็นตัวที่สูงเพื่อให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งสูง ซึ่งทนการสึกหรอได้ดี เมื่อชิ้นงานที่เตรียมมีการสะสมของความร้อนมาก เมื่อทำการเชื่อมพอกแข็งจึงทำให้ความแข็งของชั้นพอกแข็งลดต่ำลง ความต้านทานการสึกหรอจึงต่ำกว่าที่ควร

บทที่ 4

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการทดลอง

1. เหล็กกล้าแมงกานีสเมื่อได้รับแรงกระแทกจะมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการทนการสึกหรอของเหล็กกล้าแมงกานีสทั้งก่อนและหลังตีกระแทกมีค่าใกล้เคียงกัน
2. ไม่พบรอยแตกขนาดใหญ่ระหว่างชั้นรองพื้นกับวัสดุฐาน และชั้นรองพื้นกับชั้นสร้างเนื้อ
3. การเชื่อมในบรรยากาศทำให้มีบริเวณผลกระทบที่กว้าง มีขนาดเกรนบริเวณผลกระทบที่โตกว่า และมีปริมาณของแมงกานีสคาร์ไบด์ที่มากกว่าการเชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ
4. การเชื่อมในบรรยากาศ เมื่อได้รับการตีกระแทก จะพบรอยแตกขนาดเล็กในบริเวณผลกระทบเพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานที่เชื่อมในบรรยากาศจะมีรอยแตกเพิ่มมากขึ้นกว่าชิ้นงานที่เชื่อมโดยการควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ
5. ในกรณีเชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ การเชื่อมชั้นสร้างเนื้อ 3 ชั้น ช่วยลดรอยแตกขนาดเล็กบริเวณชั้นผลกระทบลงได้ ขณะที่ใช้งานเมื่อมีแรงกระแทก ซึ่งสอดคล้องกับสภาพการทำงานจริง
6. การเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น ให้ความแข็งที่สูงกว่าการเชื่อมพอกแข็งเพียงชั้นเดียว แต่เมื่อได้รับแรงกระแทกจากลูกตุ้มเหล็กก็มีรอยแตกที่ผิวมากกว่าด้วยเช่นกัน
7. ผลการทดสอบการสึกหรอในวัสดุฐาน และชิ้นงานที่เชื่อมด้วยชั้นสร้างเนื้อเพียงอย่างเดียว ความต้านทานการสึกหรอไม่แตกต่างกันทั้งก่อนและหลังการตีกระแทก
8. กรณี B-3U-2H ที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำให้ต้านทานการสึกหรอได้ดีที่สุด ทั้งก่อนและหลังการตีกระแทกจากลูกตุ้มเหล็ก
9. การตีกระแทกจากลูกตุ้มเหล็กทำให้ความต้านทานการสึกหรอลดลง ในทุกกรณี โดยความต้านทานการสึกหรอจะลดลงมากกว่าในกรณีที่เชื่อมในบรรยากาศ

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเชื่อมชิ้นงานที่มีวัสดุฐานที่เป็นเหล็กกล้าแมงกานีสควรมีการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุฐานไม่ให้สูงเกิน (ทางทฤษฎีระบุไว้ที่ 350 °C) ซึ่งวิธีที่จะควบคุมอุณหภูมิที่ราคาถูก และหาได้ง่ายที่สุดก็คือใช้น้ำเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิ
2. การเชื่อมรองพื้นเพื่อป้องกันปัญหาสมบัติที่แตกต่างกันของชั้นพอกแข็งและวัสดุฐาน ที่จะทำให้เกิดรอยแตก และมีปัญหาการยึดติดกันไม่ดีของชั้นเชื่อมได้

3. จากผลการวิจัยควรเชื่อมเหล็กกล้าแมงกานีสโดยควบคุมอุณหภูมิเพื่อป้องกันการแตกร้าวบริเวณผลกระทบร้อนที่จะเกิดขึ้นเมื่อได้รับแรงกระแทกจากการใช้งาน

4. ชั้นสร้างเนื้อควรมีจำนวนชั้นสร้างเนื้ออย่างน้อย 3 ชั้น เพื่อช่วยดูดซับพลังงานจากการตีกระทบ

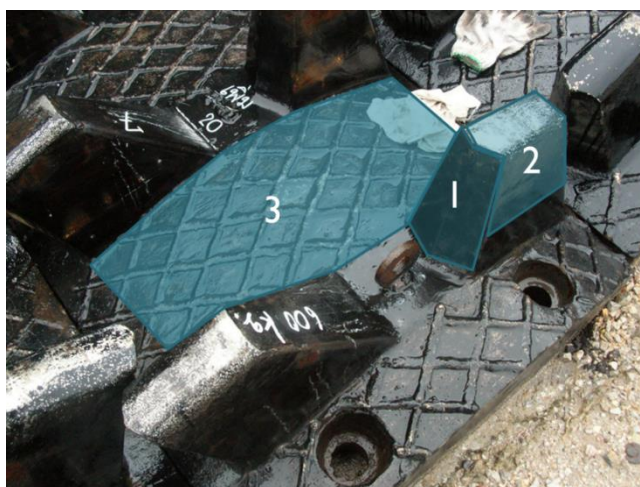
5. ชั้นพอกแข็งควรเชื่อม 2 ชั้น เพื่อช่วยลดปัญหาการเงี้ยวของเนื้อเชื่อม ที่จะทำให้ชั้นพอกแข็งมีความแข็งต่ำและทนการสึกหรอได้น้อย โดยจากผลการทดสอบการสึกหรอ ชิ้นงาน ที่เชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ ร่องพื้น 1 ชั้น สร้างเนื้อ 3 ชั้น และพอกแข็ง 2 ชั้น (B-3U-2H) มีค่าต้านทานการสึกหรอดีที่สุดทั้งก่อนและหลังการตีกระทบ

6. มีสองแนวทางในการป้องกันการสึกหรอ ดังนี้

6.1 ใช้งานของใหม่จนกระทั่งสึกหรอไม่เกิน 10 มิลลิเมตร แล้วค่อยทำการเชื่อมพอกแข็งให้ขนาดกลับมาเท่าขนาดเดิม

6.2 เชื่อมพอกแข็งเพื่อป้องกันการสึกหรอตั้งแต่เริ่มต้น ก่อนใช้งาน และเมื่อเนื้อพอกแข็งสึกใกล้เคียงกับเนื้อชั้นรองพื้น ให้เชื่อมพอกแข็งเพิ่มเนื้อซ้ำ

7. จากผลการทดสอบ พบว่าถ้าเชื่อมลวดเชื่อมที่เหล็กแมงกานีส ไม่มีความจำเป็นที่จะทำเวิร์คฮาร์ดเดนนิงก่อน เพราะเนื้อเชื่อมจะเพิ่มความแข็งทันทีที่เจอแรงกระแทกจากการทำงาน



รูปที่ 4.1 การเชื่อมซ่อมชิ้นส่วนไม่คู่

8. การเชื่อมซ่อมไม่คู่ตามรูปที่ 5-1 บริเวณหมายเลข 1 ซึ่งได้รับแรงกระแทกสูง เชื่อมซ่อมด้วยลวด DIN 8555: E 7-UM-250-KP โดยมีการควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำขณะเชื่อมซ่อม บริเวณหมายเลข 2 และ 3 เชื่อมซ่อมโดยรองพื้นด้วยลวด DIN8556: E 188MnR26 สร้างเนื้อ ด้วยลวด DIN 8555: E 7-UM-250-KP อย่างน้อย 3 ชั้น และพอกแข็ง 2 ชั้นด้วยลวด DIN 8555: E 6-UM-60 โดยควบคุมอุณหภูมิขณะเชื่อมด้วยน้ำ ไม่ให้อุณหภูมิของเหล็กกล้าแมงกานีสสูงเกิน 350 °C

บรรณานุกรม

- [1] จิตติ บัวพูน, นิรมิต เดชสุภา, ประศาสน์ สุบรรพวงศ์, ณรงค์ฤทธิ์ โทธรัตน์. การวิเคราะห์การชำรุดเบื้องต้น. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2550.
- [2] ณรงค์ฤทธิ์ โทธรัตน์. เทคโนโลยีการเชื่อมพอกแข็ง. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย; 2550.
- [3] Bailey N. Weldability of ferritic steel. Cambridge: Abington Publishing; 1994.
- [4] Buchely MF, Gutierrez JC, Leon LM, Toro A. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear* 2005; 259: 52–61.
- [5] Kotecki DJ, Ogborn JS. Abrasion resistance of iron-based hardfacing alloys. *Welding research supplement* 1995; 75: 269s-78s.
- [6] Yang JH, Wang XB. K/Na-treated Fe-Cr-C hardfacing alloys with high-impact-abrasion resistance. *Welding research supplement* 1995; 74: 103s-107s.
- [7] Yamamoto S. Arc welding of specific steels and cast irons. 3rd ed. Kanagawa: Shinko Welding Service; 2008.
- [8] Bohler welding. *Welding guide*. Kapfenberg: The Institute.
- [9] UTP Schweissmaterial. *Manual electrodes solders and fluxes inert-gas, submerged-arc and flux-cored wires metal powders*. 9901th ed. Bad Krozingen: The Institute.
- [10] Kotecki D. J., Rajan V. B. Work hardening of austenitic manganese hardfacing deposits. *Welding research supplement* 1998; 77: 293s-98s.
- [11] มนัส สติรจินดา. เหล็กกล้า. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์; 2529.
- [12] Kalandyk B., Zapala R. Effect of high-manganese cast steel strain hardening on the abrasive wear resistance in a mixture of SiC and water. *Archives of Foundry Engineering* 2013; 13: 63-6.
- [13] Weilin Y, Liang F, Zhannguang Z, Kun S, Yunhua X. Effect of surface nanocrystallization on abrasive wear properties in Hadfield steel. *Tribology International* 2009; 42: 634-41.

ภาคผนวก ก

ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุฐานและลวดเชื่อม

1. เหล็กกล้า 13 % แมงกานีส

จัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมต่ำ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1100 °C จากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยน้ำ มีความแข็ง 230 HV โดยมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ และมีแมงกานีสคาร์ไบด์กระจายอยู่ตามขอบเกรน เหล็กกล้าแมงกานีสเมื่อได้รับแรงกระแทกจะเกิดเวิร์คฮาร์ดเดนนิ่ง มีความแข็ง 450 HV

ตารางที่ ก.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า 13 % แมงกานีส (% น้ำหนัก)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	S	P	Fe
1.0810	0.8545	13.5082	0.3341	2.0643	0.0517	0.0065	0.0702	Balance

2. ลวดเชื่อมชั้นรองพื้น

ใช้ลวดตามมาตรฐาน DIN 8556: E 18 8 Mn R 26 (AWS A5.4-92: E 307-16) เป็นโลหะในกลุ่มเหล็กกล้าความแข็งสูง (High strength alloyed steel) ลวดเชื่อมชนิดนี้เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดรูทิลสำหรับเชื่อมโลหะที่มีความแตกต่างกัน มีความแกร่งที่เหมาะสมในการเชื่อมแทรกกลางระหว่างโลหะที่มีความแข็งสูงกับชั้นพอกแข็ง สามารถต้านทานการแตกได้เป็นอย่างดี ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 850 °C และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติที่อุณหภูมิต่ำถึง -10 °C ก่อนการเชื่อมจะต้องอบลวดเชื่อมเป็นเวลา 2 โมง ที่อุณหภูมิ 200 °C สามารถเชื่อมได้ทั้งกระแสตรง (DC+) และกระแสสลับ (AC) โดยลวดเชื่อมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 มิลลิเมตร ควรใช้กระแสเชื่อม 110-140 แอมแปร์

3. ลวดเชื่อมชั้นสร้างเนื้อ

ใช้ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน DIN 8555: E 7-UM-250-KP เหมาะกับการใช้งานในชิ้นส่วนที่ได้รับความดันสูงและเกิดการกระแทก ประกอบกับมีการเสียดสีเกิดขึ้น ลวดเชื่อมชนิดนี้จัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าแมงกานีส สามารถเชื่อมลงบนเหล็กแมงกานีสที่มีความแข็งสูงได้ เหมาะกับงานเช่น ฟันม่ถ่านหินในเหมือง และโรงงานซีเมนต์ เป็นต้น มีโครงสร้างออสเทนไนต์ เนื่องจากมีการเพิ่มธาตุโครเมียม ช่วยในการลดแรงเสียดทานและต้านทานการกัดกร่อน เกิดเวิร์คฮาร์ดเดนนิ่งสูง และความแกร่งสูง โดยความแข็งหลังการเชื่อมมีค่าประมาณ 260 HB และหลังการทำเวิร์คฮาร์ดเดนนิ่ง ความแข็งจะสูงขึ้นถึง 550 HB ควรเชื่อมในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำ ความร้อนของแนวเชื่อมต้องไม่เกิน 250 °C หลังการเชื่อมควรทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ดังนั้นชิ้นงานควรอยู่ในอ่างน้ำ และให้เฉพาะผิวที่ใช้เชื่อมเท่านั้นไหล่น้ำ ก่อนการเชื่อมต้องอบลวดเชื่อมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 300 °C สามารถเชื่อมได้ทั้งกระแสตรง (DC+) และกระแสสลับ (AC) โดยลวดเชื่อมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 มิลลิเมตร ควรใช้กระแสเชื่อม 120-190 แอมแปร์

4. ลวดเชื่อมชั้นพอกแข็ง (Hardfacing)

ใช้ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน DIN 8555: E 6-UM-60 เหมาะกับการใช้เป็นชั้นพอกแข็งในชิ้นส่วนที่ใช้งานแล้วมีการเสียดสีและการกระแทก เกิดขึ้น โดยเฉพาะงานทางด้านเหมืองแร่ โดยค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น มีค่า 24 HRC เชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้น มีค่า 45 HRC และเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น มีค่า 56-58 HRC ก่อนการเชื่อมจะต้องอุ่นชิ้นงาน (Preheating) 250-350 °C และอบลวดเชื่อมเป็นเวลา 2 โมง ที่อุณหภูมิ 300 °C ในการเชื่อมพอกแข็ง 3-4 ชั้นควรมีการเชื่อมด้วยโลหะที่มีความแข็งต่ำเป็นชั้นรองพื้น สามารถเชื่อมได้ทั้งกระแสตรง (DC+) และกระแสสลับ (AC) โดยลวดเชื่อมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 มิลลิเมตร ควรใช้กระแสเชื่อม 130-170 แอมแปร์

ตารางที่ ก.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม DIN 8556: E 18 8 Mn R 26

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe
0.11	1.2	4.2	19.2	8.5	0.7	Balance

ตารางที่ ก.3 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม DIN 8555: E 7-UM-250-KP

C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	Fe
0.6	0.8	16.5	13.5	-	-	Balance

ตารางที่ ก.4 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม DIN 8555: E 6-UM-60

C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	Fe
0.5	0.8	1.3	7	1.3	0.5	Balance

ภาคผนวก ข

เครื่องเชื่อม

เครื่องเชื่อม Fronius รุ่น TransPuls Synergic 4000



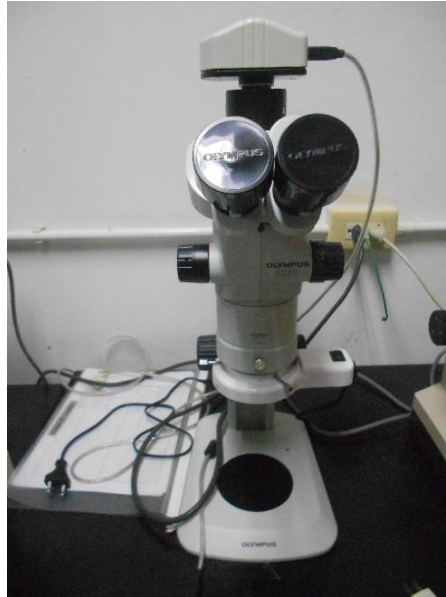
รูปที่ ข.1 เครื่องเชื่อม

Technical data

Main voltage	3x400 V
Mains fuse slow	35 A
Primary continuous current (100% d.c.)	10.3 kVA
Efficiency	89%
Welding current range (continuous)	3-400 A
Welding current at	10 min./40 °C 35% d.c. 400 A
	10 min./40 °C 35% d.c. 350 A
	10 min./40 °C 35% d.c. 250 A
Open-circuit voltage	70 V
Operating voltage	14.2-34 V
Dimension l/w/h mm	625/290/480
Weight	37 kg

ภาคผนวก ค
กล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง SZX7 Specification



รูปที่ ค.1 กล้องจุลทรรศน์

■ SZX7 specifications

Item	Specifications			
Zoom microscope body SZX-ZB7	Zoom drive: Horizontal knob system Click stop for each zoom magnification: ON-OFF switching possible Zoom ratio values: 7:1 (0.8x to 5.6) Zoom magnification indication: 0.8, 1, 1.25, 1.6, 2, 2.5, 3.2, 4, 5, 5.6 Objective mounting: Screw mounting into thread Lead-free			
Aperture iris diaphragm control: The AS unit (SZX-AS) is mountable				
Observation tube SZX-BI45 SZX-TBI SZX2-TR30 SZX2-TR30PT	SZX-BI45 Binocular tube View inclination angle 45°	SZX-TBI Tilting binocular tube View tilting angle 5° to 45°	SZX2-TR30 Trinocular tube View inclination angle 30° Light path selection: 2 steps (Binocular 100%, Binocular 50%/Photo 50%)	SZX2-TR30PT Trinocular tube View inclination angle 30° Light path selection: 2 steps (Binocular 100%, Photo 100%)
All observation tubes: Lead-free				
Interpupillary distance adjustable range: 50 to 76 mm Eyepiece clamping knob provided				
Stand SZ2-ST SZ2-ILST	SZ2-ST Standard stand		SZ2-ILST LED reflected/transmitted illumination stand	
Frame installation	Mounting diameter 76 mm			
Focusing adjustment	Knob rotation tension adjustment Focusing stroke 120 mm			
Stage plate	SZ2-SPBW (Black & white) SP-C (Glass clear transparent)		The dedicated glass plate in 100 mm dia. included	
Light source	Fiber optic illumination system SZ2-LGB mountable (option) Transmitted light illumination attachment (SZ2-ILA) mountable (option)		Transmitted illumination: LED Reflected illumination: LED Average LED life span: 6000 hrs. Input rating: 100-120 V/200-240 V~0.15/0.1 A, 50/60 Hz	
Objective lens	Model	N.A.	Working distance	
*1 The SZ2-ET auxiliary sleeve is required when the SZ2-ST/ SZ2-ILST is used.	DFPL0.5x-4*1	0.05	171 mm	
	DFPL0.75x-4	0.075	116 mm	
	DFPLAPO1x-4	0.10	81 mm	
	SZX-ACH1x	0.10	90 mm	
	DFPLAPO1.25x-2	0.125	60 mm	
	SZX-ACH1.25x	0.125	68 mm	
	DFPL1.5x-4	0.15	45.5 mm	
	DFPL2x-4	0.20	33.5 mm	
All objectives: Lead-free				
Eyepieces	*Comfort View* WHSZ series All eyepieces: Lead-free			
Weight	Configuration 1	4,360 g	5,400 g	5,200 g
	Configuration 2	5,160 g	6,200 g	6,000 g

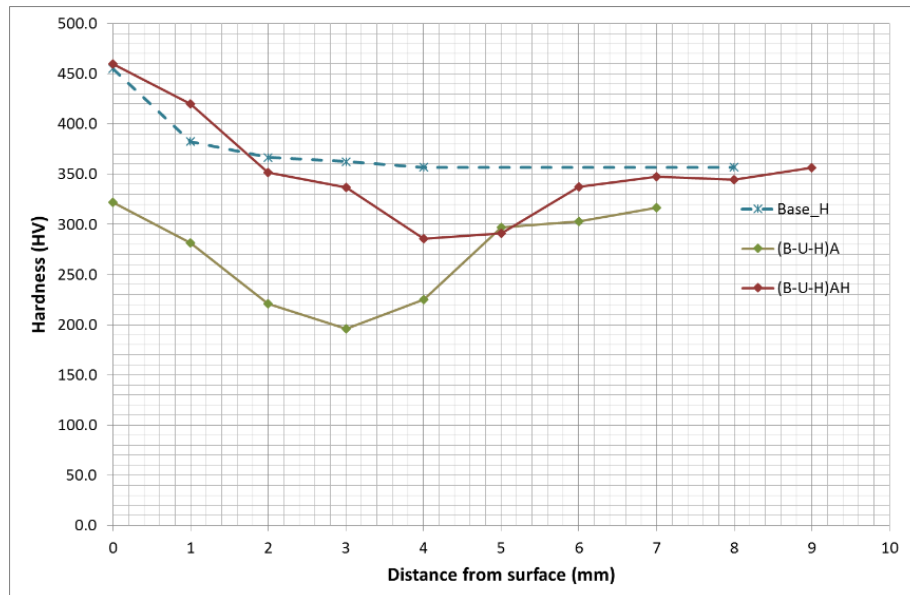
Configuration 1: SZX-ZB7 + DFPLAPO1x-4 + individual observation tube + WHSZ10x-H (2) + SZ2-ST
Configuration 2: SZX-ZB7 + DFPLAPO1x-4 + individual observation tube + WHSZ10x-H (2) + SZ2-ILST

รูปที่ ค.2 รายละเอียดกล้องจุลทรรศน์

ภาคผนวก ง
สมบัติเชิงกลของการเชื่อมแต่ละเงื่อนไข

ตารางที่ ง.1 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-U-H)A

ระยะทางจากผิวหน้า (มม.)	ความแข็ง (HV)			
	1	2	3	เฉลี่ย
0	291.6	333.0	342.0	322.2
1	267.4	283.1	293.4	281.3
2	195.0	229.6	237.5	220.7
3	189.8	220.8	177.4	196.0
4	213.9	266.0	195.5	225.1
5	303.3	324.9	263.1	297.1
6	295.4	318.6	294.6	302.9
7	317.1	311.8	321.3	316.7



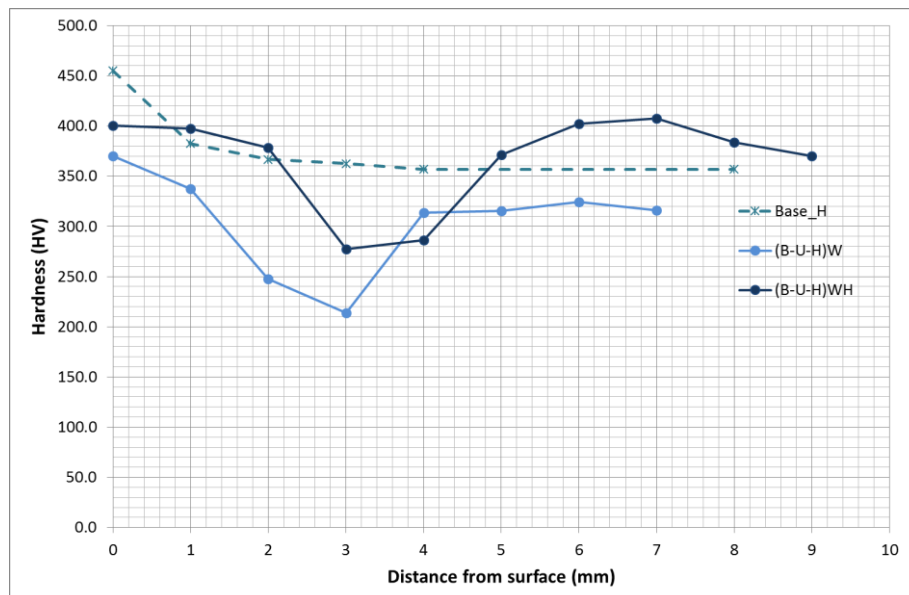
รูปที่ ง.1 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-U-H)A และ (B-U-H)AH

ตารางที่ ง.2 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-U-H)A และ (B-U-H)AH

ตัวอย่าง	(B-U-H)A	(B-U-H)AH
น้ำหนักที่หายไป (กรัม)	2.1907	2.1898

ตารางที่ ง.3 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-U-H)W

ระยะทางจากผิวหน้า (มม.)	ความแข็ง (HV)			
	1	2	3	เฉลี่ย
0	360.4	367.8	382.7	370.3
1	354.9	320.6	336.9	337.5
2	268.2	258.7	215.9	247.6
3	217.3	230.0	193.8	213.7
4	321.8	281.7	338.0	313.8
5	305.7	313.9	326.2	315.3
6	304.6	341.0	328.0	324.5
7	297.7	329.5	320.8	316.0



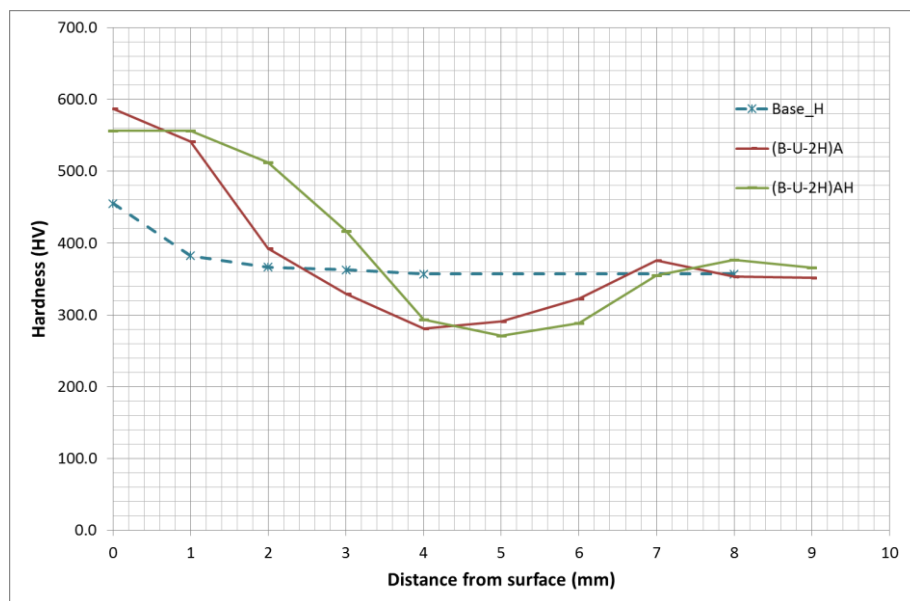
รูปที่ ง.2 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-U-H)W และ (B-U-H)WH

ตารางที่ ง.4 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-U-H)W และ (B-U-H)WH

ตัวอย่าง	(B-U-H)W	(B-U-H)WH
น้ำหนักที่หายไป (กรัม)	1.7800	2.3915

ตารางที่ ง.5 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-U-2H)A

ระยะทางจากผิวหน้า (มม.)	ความแข็ง (HV)			
	1	2	3	เฉลี่ย
0	600.3	626.3	534.3	587.0
1	558.9	567.5	497.8	541.4
2	492	369.6	317	392.9
3	399.1	319.8	269.7	329.5
4	314.7	280.2	248	281.0
5	286.8	256.7	330	291.2
6	298.4	336.4	332.4	322.4
7	395.8	366.1	366.2	376.0
8	377.3	345.9	337.4	353.5
9	347.5	364.2	342.7	351.5



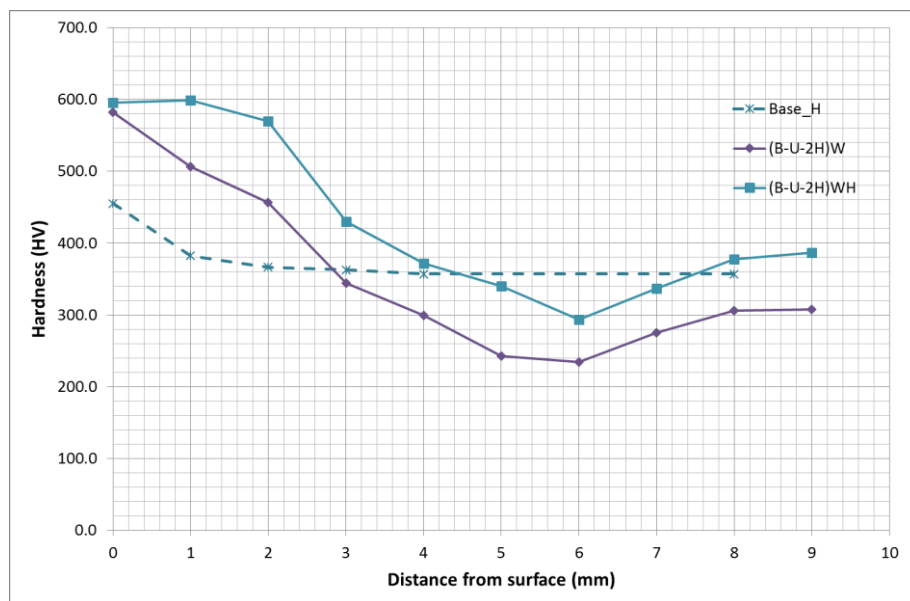
รูปที่ ง.3 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-U-2H)A และ (B-U-2H)AH

ตารางที่ ง.6 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-U-2H)A และ (B-U-2H)AH

ตัวอย่าง	(B-U-2H)A	(B-U-2H)AH
น้ำหนักที่หายไป (กรัม)	2.0262	2.4973

ตารางที่ ง.7 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-U-2H)W

ระยะทางจากผิวหน้า (มม.)	ความแข็ง (HV)			
	1	2	3	เฉลี่ย
0	585.1	627.1	534.3	582.2
1	503.7	506.7	509.1	506.5
2	436.0	519.7	414.6	456.8
3	284.3	358.4	390.3	344.3
4	239.6	350.6	308.4	299.5
5	221.6	257.7	248.6	242.6
6	238.9	234.1	229.5	234.2
7	299.0	236.1	290.4	275.2
8	323.8	293.6	299.7	305.7
9	314.8	302.8	304.0	307.2



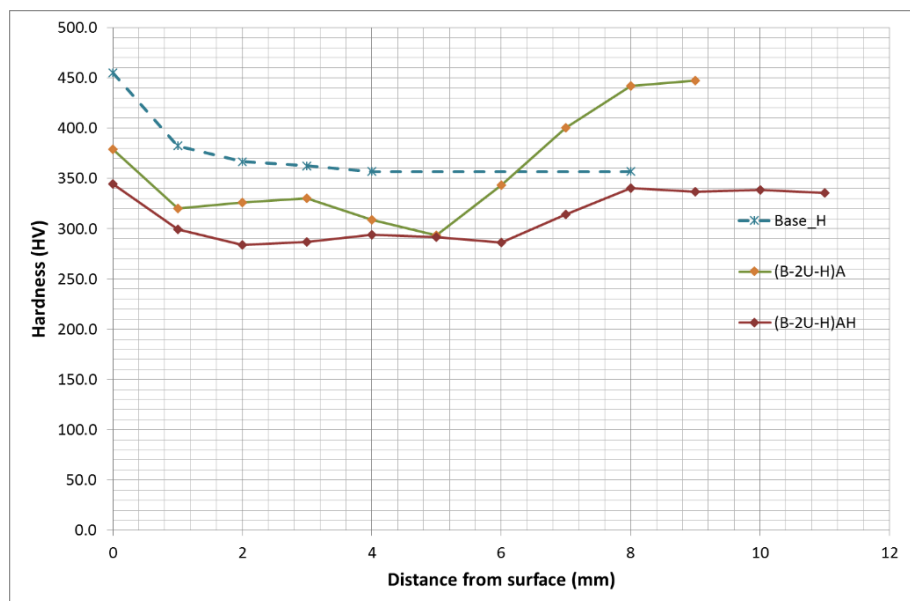
รูปที่ ง.4 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-U-2H)W และ (B-U-2H)WH

ตารางที่ ง.8 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-U-2H)W และ (B-U-2H)WH

ตัวอย่าง	(B-U-H)W	(B-U-H)WH
น้ำหนักที่หายไป (กรัม)	1.5933	1.6370

ตารางที่ ง.9 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-2U-H)A

ระยะทางจากผิวหน้า (มม.)	ความแข็ง (HV)			
	1	2	3	เฉลี่ย
0	366.9	381.3	389.4	379.2
1	340.6	329.2	291.3	320.4
2	326.8	333.7	318.6	326.4
3	331	361	298.1	330.0
4	358.2	322.1	246.1	308.8
5	317.7	335.4	227.5	293.5
6	378.6	350.4	300.4	343.1
7	406	394.3	400.9	400.4
8	432.6	469.5	423.7	441.9
9	409.2	465.8	466.9	447.3



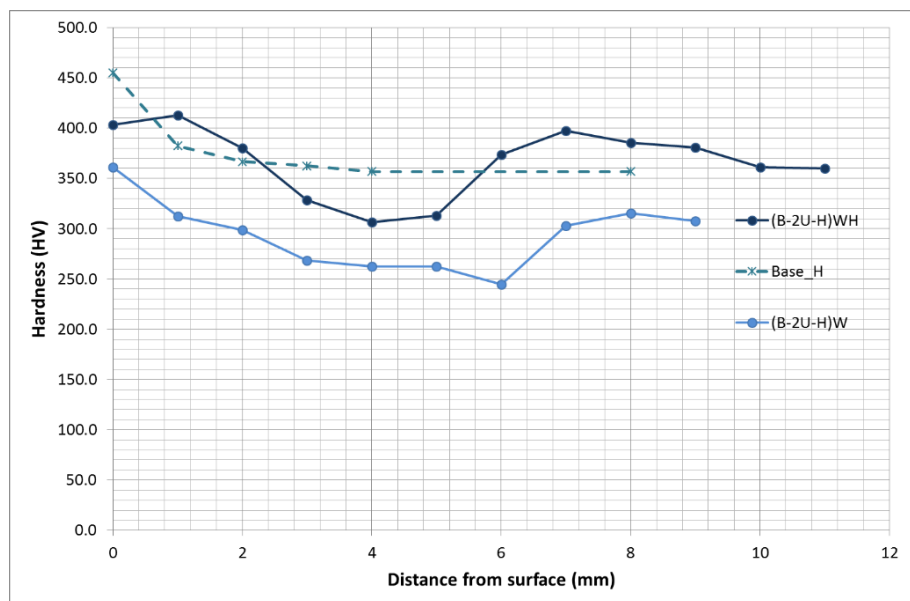
รูปที่ ง.5 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-2U-H)A และ (B-2U-H)AH

ตารางที่ ง.10 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-2U-H)A และ (B-2U-H)AH

ตัวอย่าง	(B-2U-H)A	(B-2U-H)AH
น้ำหนักที่หายไป (กรัม)	2.4757	2.4971

ตารางที่ ง.11 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-2U-H)W

ระยะทางจากผิวหน้า (มม.)	ความแข็ง (HV)			
	1	2	3	เฉลี่ย
1	263.2	316.2	358	312.5
2	256.8	288.9	275.4	273.7
3	233.5	289.8	261.5	261.6
4	258.2	262.5	250.2	257.0
5	315.7	281.5	264.6	287.3
6	322.9	313.8	307.7	314.8
7	336.8	335.5	318	330.1
8	318.2	321.3	299.9	313.1
9	290	331.7	299.4	307.0



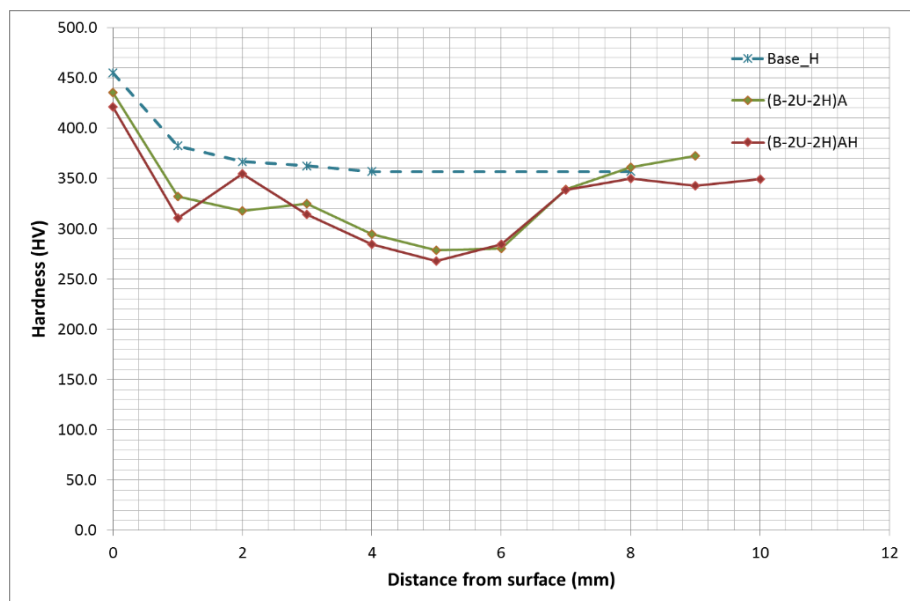
รูปที่ ง.6 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-2U-H)W และ (B-2U-H)WH

ตารางที่ ง.12 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-2U-H)W และ (B-2U-H)WH

ตัวอย่าง	(B-2U-H)W	(B-2U-H)WH
น้ำหนักที่หายไป (กรัม)	2.2981	2.3071

ตารางที่ ง.13 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-2U-2H)A

ระยะทางจากผิวหน้า (มม.)	ความแข็ง (HV)			
	1	2	3	เฉลี่ย
0	454.2	463.9	388.9	435.5
1	339	324.3	332.9	332.1
2	301.9	337.7	313.7	317.8
3	364	320.6	290.3	325.0
4	296	303.2	284.5	294.6
5	272.2	284	279	278.4
6	297.2	271.9	271.6	280.2
7	371.3	322.9	322.9	339.0
8	397.7	348.7	336.4	360.9
9	381.7	375.5	360.7	372.6



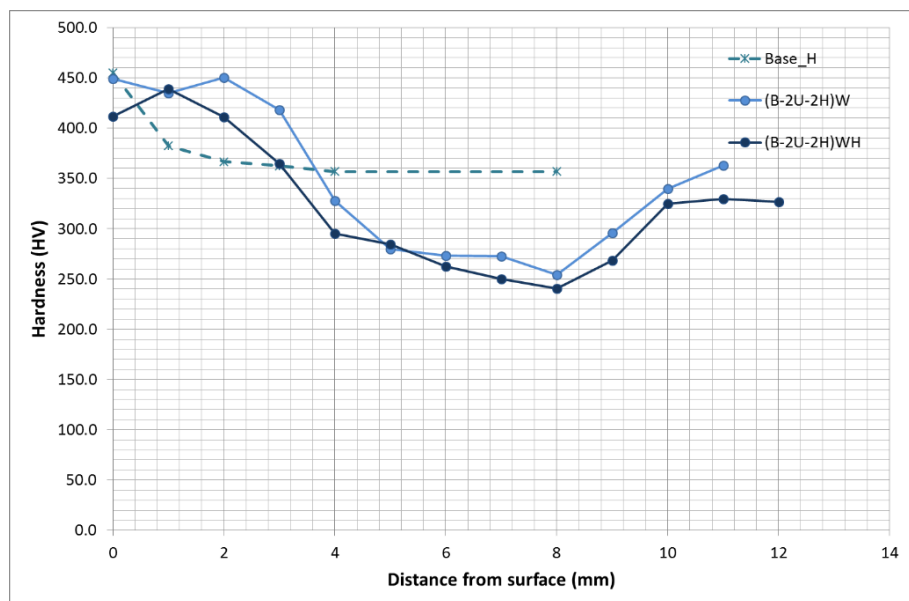
รูปที่ ง.7 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-2U-2H)A และ (B-2U-2H)AH

ตารางที่ ง.14 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-2U-2H)A และ (B-2U-2H)AH

ตัวอย่าง	(B-2U-2H)A	(B-2U-2H)AH
น้ำหนักที่หายไป (กรัม)	1.8795	2.0860

ตารางที่ ง.15 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-2U-2H)W

ระยะทางจากผิวหน้า (มม.)	ความแข็ง (HV)			
	1	2	3	เฉลี่ย
1	462.9	419.5	422.2	434.9
2	484.7	429	436.8	450.2
3	441.7	375	438.3	418.3
4	325.2	318.1	339.6	327.6
5	294.2	273.6	272.1	280.0
6	301.3	265	253.4	273.2
7	286.9	266.4	264.1	272.5
8	275	252.3	234.8	254.0
9	324.5	290.9	272.8	296.1



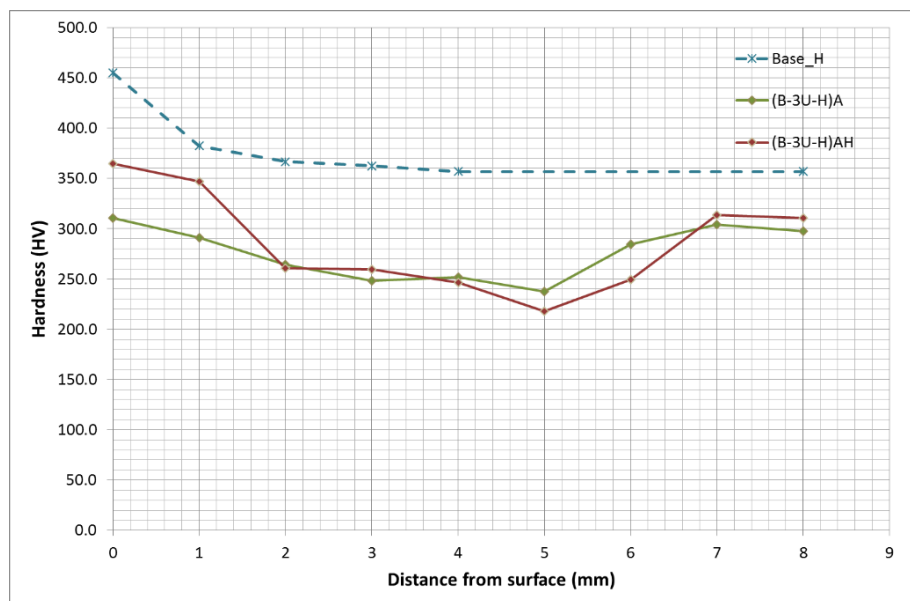
รูปที่ ง.8 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-2U-2H)W และ (B-2U-2H)WH

ตารางที่ ง.16 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-2U-2H)W และ (B-2U-2H)WH

ตัวอย่าง	(B-2U-2H)W	(B-2U-2H)WH
น้ำหนักที่หายไป (กรัม)	1.9476	1.9869

ตารางที่ ง.17 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-3U-H)A

ระยะทางจากผิวหน้า (มม.)	ความแข็ง (HV)		
	1	2	เฉลี่ย
0			310.7
1	291.8	290.6	291.2
2	244.2	284.1	264.2
3	257.5	239	248.3
4	251.8	252	251.9
5	239.5	235.3	237.4
6	281.5	287.5	284.5
7	307	301.3	304.2
8	295.2	299.5	297.4



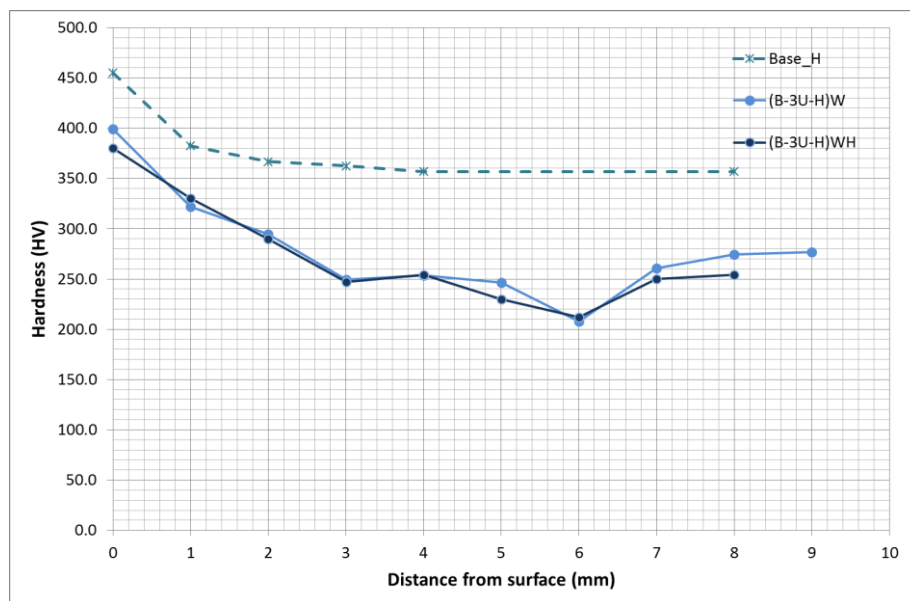
รูปที่ ง.9 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-3U-H)A และ (B-3U-H)AH

ตารางที่ ง.18 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-3U-H)A และ (B-3U-H)AH

ตัวอย่าง	(B-3U-H)A	(B-3U-H)AH
น้ำหนักที่หายไป (กรัม)	1.8491	2.6438

ตารางที่ ง.19 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-3U-H)W

ระยะทางจากผิวหน้า (มม.)	ความแข็ง (HV)		
	1	2	เฉลี่ย
0			399.3
1	321.8		321.8
2	295.7	293.6	294.7
3	247.9	250.9	249.4
4	258.9	248.1	253.5
5	241.5	251.7	246.6
6	198.2	218	208.1
7	280.1	241.2	260.7
8	266	282.4	274.2



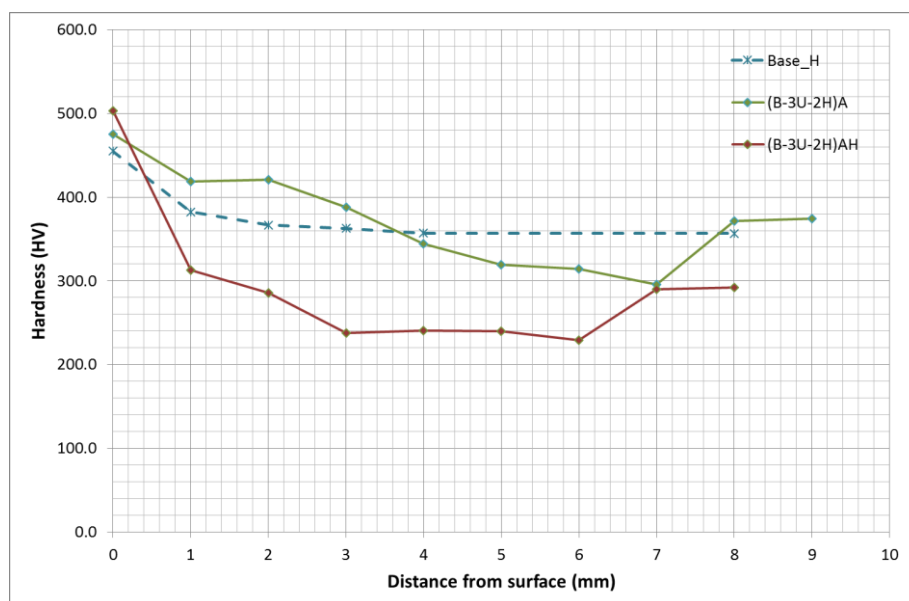
รูปที่ ง.10 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-3U-H)W และ (B-3U-H)WH

ตารางที่ ง.20 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-3U-H)W และ (B-3U-H)WH

ตัวอย่าง	(B-3U-H)W	(B-3U-H)WH
น้ำหนักที่หายไป (กรัม)	2.0242	2.0916

ตารางที่ ง.21 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-3U-2H)A

ระยะทางจากผิวหน้า (มม.)	ความแข็ง (HV)		
	1	2	เฉลี่ย
0			475.3
1	380.9	456.4	418.7
2	393.1	448.9	421.0
3	329.3	446.8	388.1
4	340.4	348.4	344.4
5	323	316.1	319.6
6	316	313.2	314.6
7	300	290.8	295.4
8	359.4	383.2	371.3
9	366.1	382.4	374.3



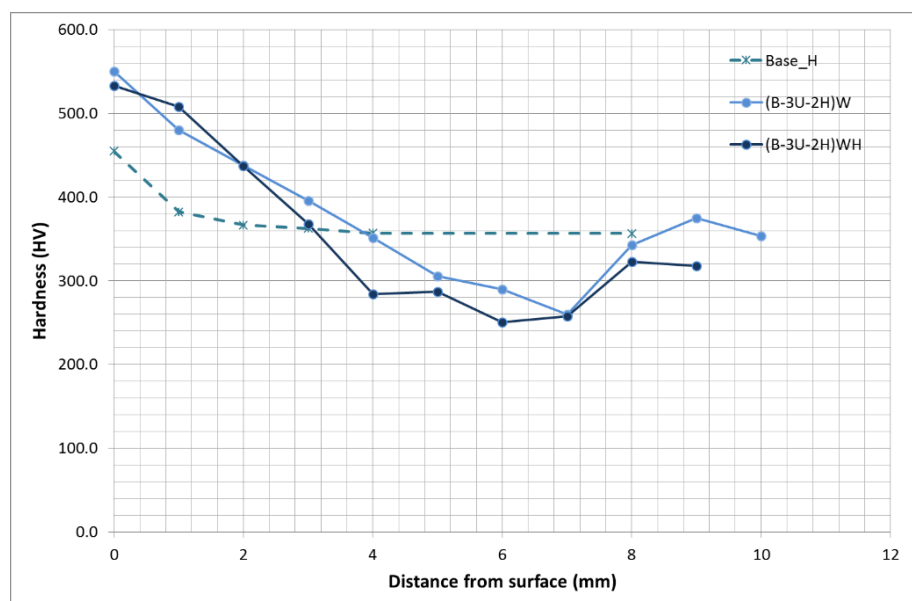
รูปที่ ง.11 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-3U-2H)A และ (B-3U-2H)AH

ตารางที่ ง.22 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-3U-2H)A และ (B-3U-2H)AH

ตัวอย่าง	(B-3U-2H)A	(B-3U-2H)AH
น้ำหนักที่หายไป (กรัม)	1.3965	2.8494

ตารางที่ ง.23 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-3U-2H)W

ระยะทางจากผิวหน้า (มม.)	ความแข็ง (HV)		
	1	2	เฉลี่ย
0			550.1
1	476	484.9	480.5
2	383	492.5	437.8
3	362	429.6	395.8
4	351	351.2	351.1
5	300	311.2	305.6
6	300.6	279	289.8
7	262.8	256.9	259.9
8	340.6	345.2	342.9
9	375.1	375.2	375.2



รูปที่ ง.12 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (B-3U-2H)W และ (B-3U-2H)WH

ตารางที่ ง.24 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน (B-3U-2H)W และ (B-3U-2H)WH

ตัวอย่าง	(B-3U-2H)W	(B-3U-2H)WH
น้ำหนักที่หายไป (กรัม)	1.5776	1.7678

ภาคผนวก จ
บทความวารสาร

Wear behavior of hardfacing deposits on Hadfield steel

Chanin Dumrudkarn^{1, a}, and Prapas Muangjunburee^{1, b*}

¹ Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, 90112 Thailand

^ac dumrudkarn@gmail.com, ^{b*} mprapas@eng.psu.ac.th

Keywords: Mn steel, Hardfacing, Abrasive wear

Abstract The objectives of this research aim to develop the welding procedure for multilayer hardfacing of 13% Mn cast steel and to study behavior of hardfacing deposits after impact applied. Austenitic stainless steel and martensitic hardfacing electrode were selected as buffer and hardfacing, respectively. According to the shielded metal arc welding (SMAW) process, two different atmosphere conditions; control cooling rate on specimen (by water) and uncontrolled cooling rate on specimen (by air) during welding were compared. Macrostructure and microstructure were investigated by optical microscope. The hardfacing deposits were also determined by the dry sand rubber wheel machine according to procedure A of the ASTM G65 standard. The results indicated that the hardfacing layers revealed martensitic type microstructure in both controlled and uncontrolled cooling rate but their grain shapes were a little difference. Austenitic type microstructure of buffer layer was observed. By employing the controlled cooling rate condition, higher amount of carbide was provided. The best wear resistance was obtained from controlled cooling rate condition.

Introduction

Due to its properties of high hardness, good toughness and high wear resistance, steel are widely used in applications such as mine and rock crushing, etc which involve impact and abrasion [2, 3]. High Mn steel is a most used material for wear and impact resistance applications. It was found that 11-14% of Mn can stabilize austenitic structure at room temperature. However, Mn₃C can be precipitated [1,3,4] in case temperature greater than 300°C is generated on Mn steel and this results in steel brittle.

Normally, crush rolls (made from Mn steel) in crusher is used for reduction of coal size particle. The crusher in practical operated continuously for a long period. Crush rolls can be abrasive and decrease its efficiency in case the running time is longer than 15 hours.

Generally, hardfacing is applied for crush roll repairing. This technique can be exploited by welding on any bases using high hardness electrode for extension their life time [5, 6].

The present investigation aims to study buffer, build-up and hardfacing electrode applied in shielded metal arc welding (SMAW) on 13% Mn steel in terms of their microstructure, hardness and abrasive wear resistance.

Experimental procedure

Materials and welding conditions

Three commercial electrodes were applied onto Mn steel plate according to the manufacturer's direction. DIN8556: E 188MnR26, DIN8555: E 7-UM-250-KP, DIN8555: E 6-UM-60 were used for buffer, build-up and hardfacing, respectively (Fig.1) and 280mm x 75mm x 15mm plates were used in all cases. The chemical composition of Mn Steel can be seen in Table 1, composition of each electrode was shown in Table 2 and SMAW process parameters were specified in Table 3.

The deposition was carried out in flat position, by using SMAW technique in two different atmospheric conditions. The first is uncontrolled cooling rate on specimens by welding in the air and another is controlling cooling rate by water.

Table 1
Chemical composition of Mn steel plate [wt%]

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Fe
1.08	0.85	13.5	0.33	2.06	0.05	balance

Table 2
Chemical composition of electrodes [wt%]

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Fe
Hardfacing (DIN8555:E 6-UM-60)	0.5	0.8	1.3		7	1.3	balance
Build-up (DIN8555:E 7-UM-250-KP)	0.6	0.8	16.5		13.5		balance
Buffer (DIN8556:E 188MnR26)	0.11	1.2	4.2	8.5	19.2	0.7	balance

Table 3
SMAW process parameters

Electrode	Current [A]	Voltage [V]	Travel speed [mm min ⁻¹]	Number of layer
Hardfacing (DIN8555:E 6-UM-60)	120-123	20-25	23-24	1 2
Build-up (DIN8555:E 7-UM-250-KP)	108-118	21-25	21-25	1
Buffer (DIN8556:E 188MnR26)	105-120	25-30	25-30	1

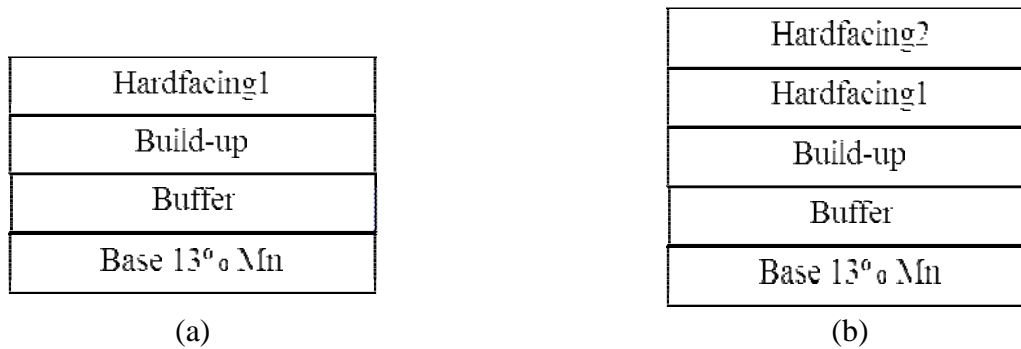


Fig.1. Schematic of welding layers deposition in the different atmospheric condition.

Hardness Measurement

The hardness of the deposits was measured by Vickers hardness method with a load of 100kgf.

Microstructure analysis

Optical microscope (OM) was used to analyze the microstructure of the specimens. Cross sections of the weld were polished and etched with Kalling's agent (buffer and build-up) and Nital 2% (base and hardfacing).

Abrasive wear tests

Abrasive wear tests were carried out in a dry sand-rubber wheel testing machine according to ASTM G65 standard. Rounded quartz particles with mean diameter in the range of 212 and 300 μm were used. The normal load and duration of the tests are shown in Table 4.

Table 4
Abrasive wear test conditions, dry sand-rubber wheel testing machine

Procedure	Load [N]	Velocity [rpm]	Wear distance [m]
A	130	200	4000

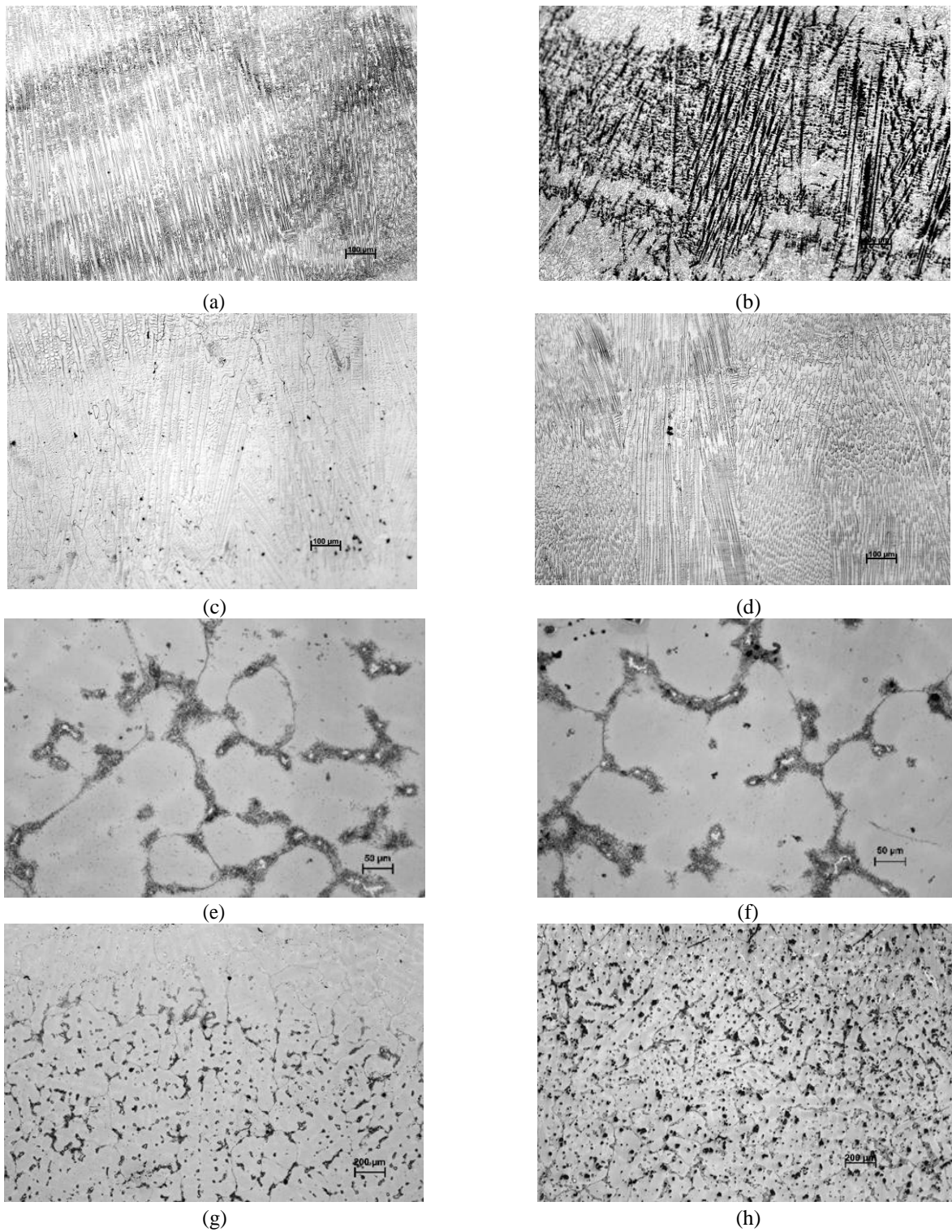


Fig.2 Microstructures: (a) hardfacing, first layer, (b) hardfacing, second layer, (c) buffer layer, (d) build-up layer, (e) Mn steel base, welding in air, (f) Mn steel base welding in water, (g) heat effected zone, welding in air, (h) heat effected zone, welding in water.

Results and discussion

Microstructure

The typical microstructure of the studied welding deposit is shown in Fig.2. The hardfacing layers show martensite which is penetrated in austenite matrix. The darker phase is martensite (Fig.2 a, b). The martensite on the second layer is sharper than the first layer. The buffer (Fig.2 c) and build-up layer (Fig.2 d) illustrate cellular dendritic structure which is austenite phase.

Specimens in uncontrol cooling rate welding; in air, carbide (Fig. 2 e) was precipitated and coarse grain area (Fig.2 g) was found in boundary between base and buffer layer, which are more than in the controlling cooling rate by water (Fig.2 f and g).

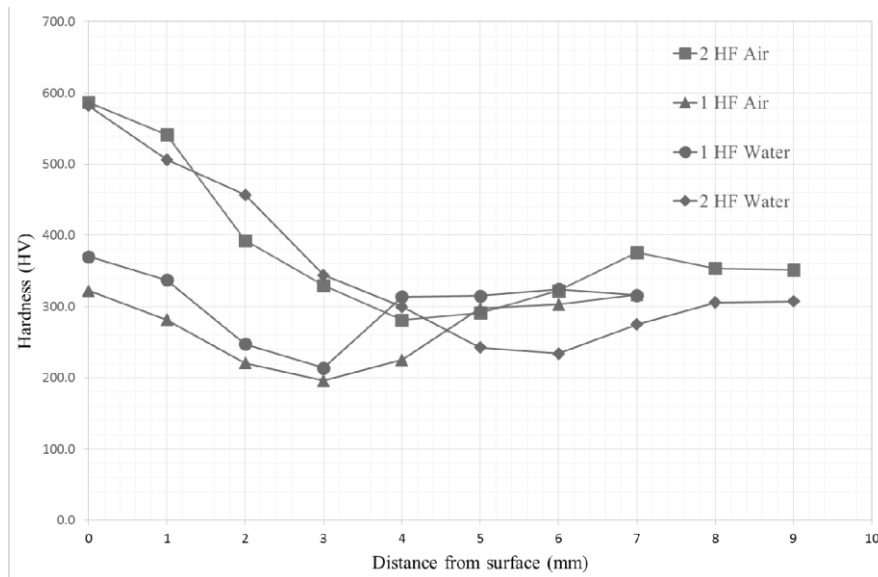


Fig.3 Hardness profile of cross section for welded specimens.

Hardness and abrasive wear test

Surface hardness of one hardfacing layer displayed about 320-360 HV and 580-600 HV for two hardfacing layers which effected from low dilution levels made more martensite phase in both atmospheric conditions (Fig.3). The best abrasive wear resistance was obtained in controlling cooling rate by water for two hardfacing layers (Fig.4).

There was no any significance for base hardness in one hardfacing layer in each specimen (~300 HV). On the other hand, base hardness in two hardfacing layers by uncontrolling cooling rate welding by air (~340 HV) is harder than by controlling cooling rate welding by water (~300 HV). This is due to the fact that there was heat deposition during welding which increased carbide precipitation.

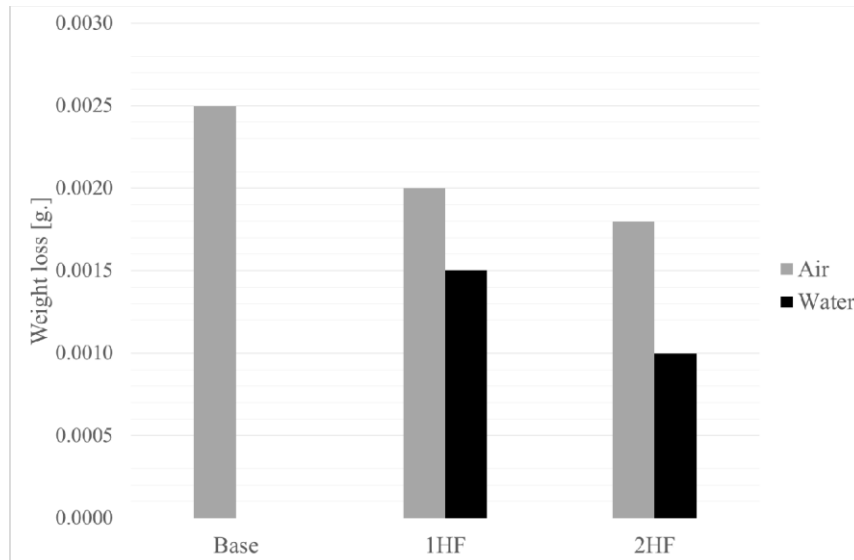


Fig.4 Mass loss of the welded specimens

Conclusions

- Carbide and coarse grain were generated on base metal by welding in un-controlling cooling rate by air.
- Surface hardness of two hardfacing layers is greater than one hardfacing layer.
- Surface hardness of specimens welded in controlling cooling rate by water is greater than in un-controlling cooling rate by air.
- Welding in controlling rate by water provided the best abrasive wear resistance.

Acknowledgement

The authors thank Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) for financial support. Special thank to the Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University.

References

- [1] D.K. Subramanyam, A.E. Swansiger, H.S. Avery, Austenitic manganese steels, ASM Metals Handbook Volume 1, pp.1951-1962.
- [2] Medhi Mazar Atabaki, Sajjad Jafari, Hassan Abdollah-pour, Abrasive wear behavior of high chromium cast iron and Hadfield steel-A comparison, Journal of iron and steel research, International. 19(4) (2012) 43-50.
- [3] S.W. Bhero, B. Nyembe, K. Lentsoana, Common causes of premature failure of Hadfield steel crushers and hammers used in the mining industry international conference on mining, Mineral Processing and Metallurgical Engineering (ICMMME'2013). April 15-16 (2013).
- [4] J.Mendez, M.Ghoreshy, W.B.F.Mackay, T.J.N.Smith, R.W.Smith, Weldability of austenitic manganese steel, Journal of Materials Processing Technology. 153-154(2004)596-602.
- [5] M.F.Buchely, J.C.Gutierrez, L.M. Leon, A.Toro, The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys, Wear. 259 (2005) 52-61.
- [6] John J. Coronada, Holman F. Caicedo, Adolfo L.Gomez, The effects of welding process on abrasive wear resistance for hardfacing deposits, Tribology International. 42 (2009) 745-749.