

การศึกษาคุณสมบัติโลหะเชื่อมโดยการจำลองทางกายภาพ

Study Properties of Weld Metal by Physical Simulation

นพกร ภูระยา¹, อิศรทัต พึ่งอิน²

¹ สาขาวิศวกรรมเชื่อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

² ศูนย์เทคโนโลยีเชื่อมบำรุงรักษา สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

126 ถนนประชาอุทิศ บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail: nphuraya@yahoo.co.th

บทคัดย่อ

โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อม ER309, ER308L, ER316, ER347, ER70S-6, SS304, CS (Carbon Steel) และ FTC (Fused Tungsten Carbide) สามารถจำลองทางกายภาพได้โดยการใส่แม่พิมพ์ทองแดงขนาดเล็กร่วมกับกระบวนการเชื่อมทิก (Gas Tungsten Arc Welding; GTAW) และกระบวนการเชื่อมแก๊ส (Oxy-Acetylene Welding) วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของโลหะเชื่อม (Weld metal) ทั้งในเชิงโครงสร้างทางจุลภาค ปริมาณเฟอร์ไรต์ที่วัดด้วย Ferrite Scope และเปรียบเทียบปริมาณเฟอร์ไรต์ที่ได้จากการทำนายด้วย Schaeffler Diagram สำหรับการจำลองโลหะเชื่อมของการเชื่อมพอกผิวแข็ง ค่าความแข็งของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาค ได้ทำการเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มาจากกระบวนการเชื่อมชิ้นงานจริง ผลของการศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะศึกษาคุณสมบัติของโลหะเชื่อมจากแม่พิมพ์ทองแดงขนาดเล็ก

Abstract

The microstructures of weld metal of ER309, ER308L, ER316, ER347, ER70S-6, SS304, Carbon Steel (CS) and Fuse Tungsten Carbide (FTC) can be physically simulated through a small size copper mold using Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) and Oxy-Acetylene Welding (OAW). The proposes were to study the properties of weld metal in term of both microstructure and ferrite content measured by a Ferrite

Scope, as well as comparing with that derived from a prediction diagram (Schaeffler Diagram). For the weld hard facing, the micro-hardness and microstructure were compared with an actual weld. The study showed the possibility of using a small size copper mold to physically simulate a weld metal.

1. บทนำ

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์คุณสมบัติของชิ้นงานเชื่อมในด้านต่าง ๆ เช่น คุณสมบัติทางกล ความต้านทานการกัดกร่อน การต้านทานการแตกร้าว เป็นต้น โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมสามารถทำนายได้โดยใช้ schaeffler Diagram [1] ดังแสดงใน รูปที่ 1 โดยที่ Schaeffler Diagram เป็นไดอะแกรมที่ใช้ในการคาดประมาณปริมาณเฟอร์ไรต์ (Ferrite Content) ที่จะเกิดขึ้นในโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อม โดยผ่านตัวแปรที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคสองกลุ่มคือ กลุ่มปริมาณโครเมียมเทียบเท่า (chromium equivalent; Cr_{eq}) และกลุ่มปริมาณนิกเกิลเทียบเท่า (nickle equivalent; Ni_{eq}) ทั้งนี้เพื่อระบุตำแหน่งส่วนผสมของวัสดุชิ้น ๆ ลงบนไดอะแกรม ซึ่งจะทำให้สามารถทำนายปริมาณเฟอร์ไรต์ของโลหะเชื่อมที่ผสมอยู่ในโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อม

ในสภาวะการเชื่อมจริง ส่วนที่หลอมบนชิ้นงานเชื่อมจะมีทั้งลวดเชื่อมและชิ้นงานโลหะพื้น (Base Metal) หรือมีเพียงโลหะพื้นอย่างเดียว (autogenous welding) อย่างไรก็ตามตามส่วนที่หลอมละลายและแข็งตัวอย่างรวดเร็วจะกลายเป็น

โลหะเชื่อม (Weld Metal) ซึ่งจะมีโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างไปจากเดิม ถึงแม้ว่าส่วนผสมทางเคมีโดยรวม (Bulk Composition) จะไม่เปลี่ยนแปลงก็ตาม ในกรณีที่มีการเติมลวดเชื่อมหรือการเชื่อมวัสดุต่างชนิดกัน (Dissimilar Joining) จะมีการผสมกันของส่วนผสมทางเคมีของวัสดุแต่ละชนิดที่นำมาเชื่อมหรือหลอมรวมกันเรียกว่า “ความเจือจาง” (Dilution) โดยมีวิธีคำนวณดังสมการที่ 1 และแสดงดังรูปที่ 2

$$\%Dilution = s / (s+S) * 100$$

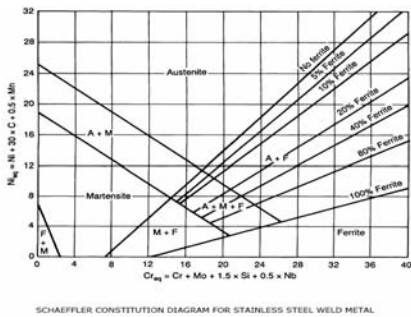
s= Area of Molten Parent Plate

(Shown hatched)

S= Total Area of Molten Pool

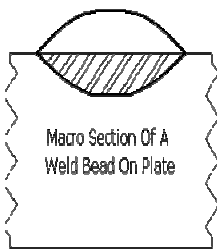
(Area Enclosed by Res Line)

(1)



SCHAEFFLER CONSTITUTION DIAGRAM FOR STAINLESS STEEL WELD METAL

รูปที่ 1 Schaeffler Diagram



รูปที่ 2 ความเจือจาง (Dilution) [2]

การศึกษาในครั้งนี้จะเปรียบเทียบคุณสมบัติของโลหะเชื่อม (Weld metal) จากการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมทิก (Gas Tungsten Arc Welding; GTAW) [3] และกระบวนการเชื่อมแก๊ส (Oxy-Acetylene Welding) รวมทั้งทำ

การเปรียบเทียบกับงานเชื่อมขึ้นงานจริงด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊ส

ในการศึกษานี้จะจำลองสภาวะการเชื่อมจริงโดยหลอมวัสดุภายในแม่พิมพ์ทองแดงขนาดเล็ก [4] เพื่อจำลองโลหะเชื่อม เนื่องจากทองแดงมีค่าการนำความร้อนที่สูง เมื่อทำการหลอมวัสดุ แม่พิมพ์ทองแดงจะสามารถถ่ายเทความร้อนออกจากชิ้นงานทดสอบได้ดี ทำให้อัตราการเย็นตัวของชิ้นทดสอบใกล้เคียงกับการเชื่อมจริง หลังจากที่ได้โลหะเชื่อมเย็นตัวแล้วจะนำมาวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค วัดปริมาณเฟอร์ไรต์และวัดความแข็งรวมทั้งทำการเปรียบเทียบชิ้นงานทดสอบกับชิ้นงานเชื่อมจริงที่มาจากกระบวนการเชื่อมแก๊ส

2. อุปกรณ์และวิธีทดลอง

2.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ (Specimen Preparation)

วัสดุที่ใช้ทดลองจะถูกตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ความยาวประมาณ 2-3 มิลลิเมตร (mm) เพื่อให้สะดวกต่อการชั่งน้ำหนัก โดยวัสดุในการทดสอบจะถูกชั่งเพื่อให้ได้น้ำหนักรวมประมาณ 1 กรัม (g) ซึ่งพอดีกับขนาดของแม่พิมพ์ทองแดงขนาดเล็ก

2.2 การควบคุมความเจือจาง (Dilution Control)

ความเจือจางของโลหะเชื่อมสามารถควบคุมได้โดยการกำหนดน้ำหนักของวัสดุประเภทต่าง ๆ ที่จะมาผสมกัน โดยการชั่งน้ำหนัก เช่น 50FTC/50CS หมายถึง % Dilution ระหว่าง FTC กับ เหล็กกล้าคาร์บอน (CS) อย่างละ 50% หรือน้ำหนักของวัสดุทั้งสองประเภท ๆ ละ 0.5 กรัม เป็นต้น การทดลองจะทำโดยการเปลี่ยนแปลงความเจือจางตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 1

2.3 การหลอมโลหะเชื่อม (Weld Metal Melting)

วัสดุที่ผ่านการชั่งน้ำหนักตามเงื่อนไขการเจือจางที่กำหนดจะถูกนำมาใส่ในแม่พิมพ์ทองแดงขนาดเล็ก ซึ่งยึดกับโต๊ะทำงานเชื่อม หลังจากนั้นวัสดุจะถูกทำให้หลอมละลายภายในแม่พิมพ์ทองแดงด้วยกระบวนการเชื่อมทิก (Gas

Tungsten Arc Welding ; GTAW) และ กระบวนการเชื่อมแก๊ส (Oxy-Acetylene Welding) และปล่อยให้เย็นตัวภายในแม่พิมพ์ทองแดงเพื่อให้ได้เป็นโลหะเชื่อม หลังจากนั้นนำโลหะเชื่อมที่ได้จัดใส่แบบหล่อเรซินใส และนำไปขัดกระดาษทรายขัดเงาและกัดกรดสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและวัดปริมาณเฟอร์ไรต์ต่อไป

ตารางที่ 1 การกำหนดความเจือจางของชิ้นงานทดสอบ

Sample No.	Dilution	Process
1	100SS304	GTAW
2	100ER309	GTAW
3	100ER308L	GTAW
4	100ER316	GTAW
5	100ER347	GTAW
6	50ER347/50ER308L	GTAW
7	50ER347/50ER316	GTAW
8	50ER347/50SS304	GTAW
9	50ER308L/50SS304	GTAW
10	50ER308L/50SS309	GTAW
11	100ER70S	GTAW
12	50ER70S/50ER316	GTAW
13	50ER70S/50SS304	GTAW
14	70ER70S/30SS304	GTAW
15	30CS/70SS304	GTAW
16	100FTC/0CS	GTAW
17	70FTC/30CS	GTAW
18	50FTC/50CS	GTAW
19	30FTC/70CS	GTAW
20	100FTC/0CS	GAS
21	70FTC/30CS	GAS
22	50FTC/50CS	GAS
23	30FTC/70CS	GAS
24	< 10%	GAS

2.4 การวัดปริมาณเฟอร์ไรต์ (Ferrite Measurement)

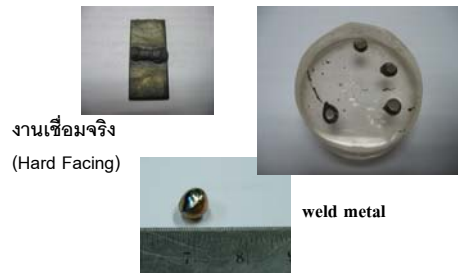
วัสดุที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะถูกเจือจางด้วยวัสดุอื่น ๆ ทำให้ปริมาณเฟอร์ไรต์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของชิ้นงานทดสอบมีปริมาณเปลี่ยนไป ปริมาณเฟอร์ไรต์สามารถวัดได้โดยอาศัย คุณสมบัติทางแม่เหล็กของชิ้นงานทดสอบผ่านเครื่องมือวัดที่เรียกว่า Ferrite Scope

2.5 การวัดค่าความแข็ง (Vicker Micro-hardness test)

สำหรับชิ้นงานโลหะเชื่อมของการเชื่อมพอกผิวแข็ง ที่ผ่านการกัดกรดจะถูกวัดความแข็งโดยวิธี Vicker Micro-hardness test และทำการเปรียบเทียบกับปริมาณเฟอร์ไรต์ควบคู่กับโครงสร้างทางจุลภาคและนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มาจาก การเชื่อมงานจริง

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้จะเป็นการจำลองโลหะเชื่อม โดยอาศัยการหลอมละลายวัสดุที่ใช้ในการทดลองในแม่พิมพ์ทองแดง ซึ่งจะได้ลักษณะของชิ้นงานทดสอบเป็นรูปร่างคล้ายทรงกลม ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปร่างลักษณะโลหะเชื่อม

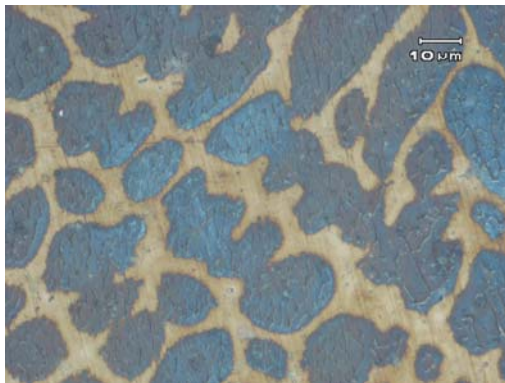
3.1 โครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อม (Weld Metal Microstructure)

3.1.1. การจำลองโลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม (Simulated Stainless Steel)

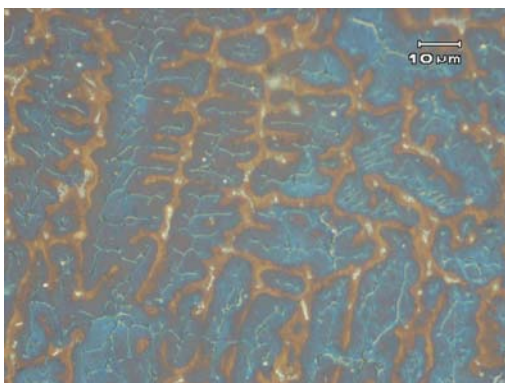
จากการทดลองพบว่าชิ้นงานทดสอบการจำลองโลหะเชื่อมมีโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างจากโลหะพื้น โดยชิ้นงานทดสอบจากลวดเติม ER308L มีโครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมเป็นออสเทนไนต์ และมีเฟอร์ไรต์ตรงบริเวณขอบเกรน (Grain Boundaries) ดังแสดงในรูปที่ 4

ในลักษณะเดียวกัน ชิ้นงานทดสอบจากลวดเติม ER347 มีโครงสร้างโลหะเชื่อมเป็นออสเทนไนต์บริเวณพื้น และมีเฟอร์ไรต์ตามบริเวณขอบเกรน (Grain Boundaries) ดังแสดงในรูปที่ 5

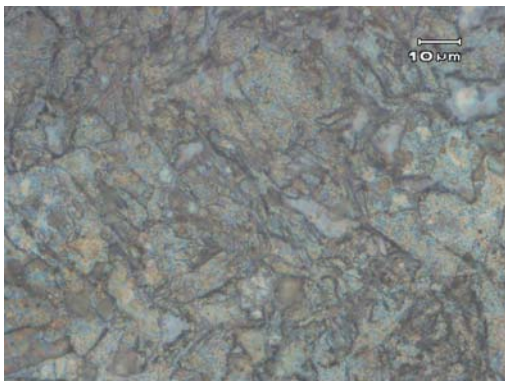
ในกรณีของชิ้นงานทดสอบที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel; CS) จะทดสอบด้วยวัสดุที่เป็นลวดเติมของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด ER70S ซึ่งจะมีโครงสร้างทางจุลภาคที่ต่างจากชิ้นงานทดสอบที่มาจากวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) โดยโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อม ER70S จะแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งจะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์เป็นจำนวนมาก



รูปที่ 4 ชิ้นงานที่ 3 โลหะเชื่อม 100ER308L

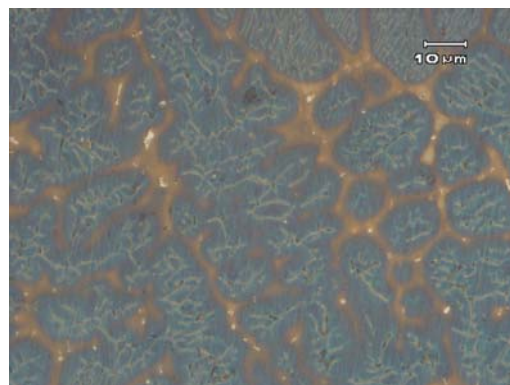


รูปที่ 5 ชิ้นงานที่ 5 โลหะเชื่อม 100%ER347

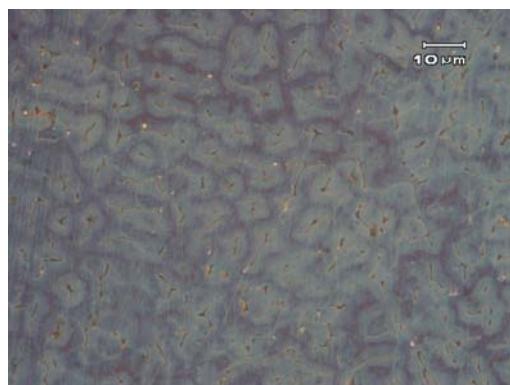


รูปที่ 6 ชิ้นงานที่ 11 โลหะเชื่อม 100ER70S

กรณีที่นำวัสดุตั้งแต่สองชนิดมาต่อกันโดยการเชื่อม โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมก็จะเป็นไปตามเส้น Tie Line ที่ต่อจุดระหว่างส่วนผสมของวัสดุสองชนิดที่นำมาต่อหรือผสมกันบน Schaeffler Diagram (รูปที่ 1) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบที่มาจากส่วนผสมลวดเติม ER347 กับ ER316 อย่างละ 50% จะมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 7 และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบจากการผสมลวดเชื่อม ER347 กับเหล็กกล้าไร้สนิม SS304 ปริมาณ 50% จะมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 8 หากแทนที่ ER347 ด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน ER70S ในปริมาณ 50% และ 70% ปริมาณเฟอร์ไรต์จะเพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ตามลำดับ โดยผลของปริมาณเฟอร์ไรต์ในชิ้นงานทดสอบจะแสดงดังในตารางที่ 2

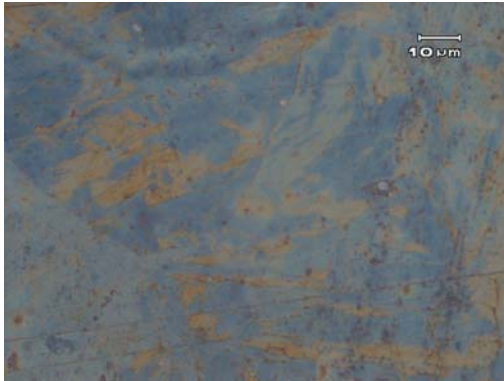


รูปที่ 7 ชิ้นงานที่ 7 โลหะเชื่อม 50ER347/50ER316

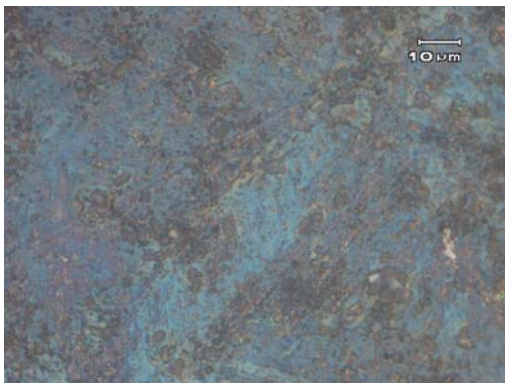


รูปที่ 8 ชิ้นงานที่ 8 โลหะเชื่อม 50ER347/50SS304

โลหะเชื่อมที่เลือกมาทำการทดสอบมีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกันออกไปซึ่งส่งผลต่อปริมาณเฟอไรต์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของโลหะเชื่อม นอกจากนี้การทำนายปริมาณเฟอไรต์ด้วย Schaeffler Diagram จะอาศัยปริมาณโครเมียมเทียบเท่ากับปริมาณนิกเกิลเทียบเท่า ซึ่งจะสามารถกำหนดตำแหน่งของส่วนผสมบนไดอะแกรมได้



รูปที่ 9 ชิ้นงานที่ 13 โลหะเชื่อม 50%ER70S/50%SS304



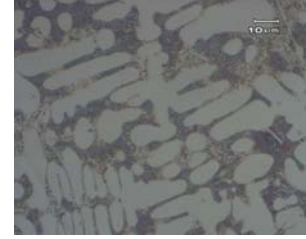
รูปที่ 10 ชิ้นงานที่ 14 โลหะเชื่อม 70%ER70S/30%SS304

โดยทั่วไปโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่แข็งตัวจากการหลอมด้วยแม่พิมพ์ทองแดงขนาดเล็กดังเช่น รูปที่ 5 มีโครงสร้างจุลภาคที่เป็นออสเตนไนต์เป็นพื้นและเฟอไรต์บริเวณตามขอบเกรน ซึ่งสัมพันธ์กับการแข็งตัวในลักษณะ FA [1] ซึ่งก็คือการแข็งตัวเป็นเฟอไรต์ก่อนหลังจากนั้นจึงกลายเป็นออสเตนไนต์ โดยระหว่างการเย็นตัวออสเตนไนต์ขยายตัว และขยายไปยังบริเวณของเฟอไรต์จนเหลืออยู่ตามขอบเกรน การแข็งตัวในลักษณะนี้จะช่วยในการป้องกันไม่ให้เกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัว (Solidification

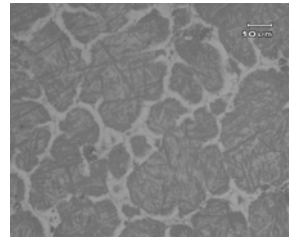
cracking) หรือบางกรณีเรียกว่าการแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking)



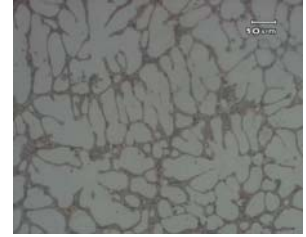
1/1_100FTC_GTAW



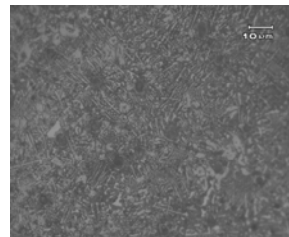
1/2_70FTC/30CS_GTAW



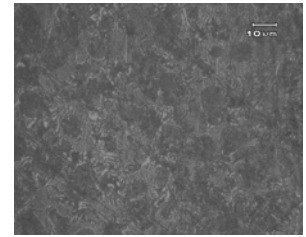
1/3_50FTC/50CS_GTAW



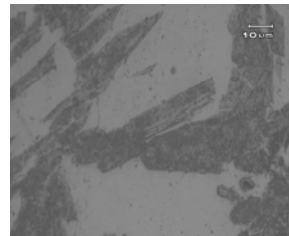
1/4_30FTC/70CS_GTAW



2/1_100FTC_GAS



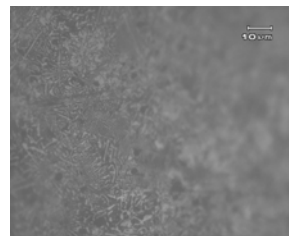
2/2_70FTC/30CS_GAS



2/3_50FTC/50CS_GAS

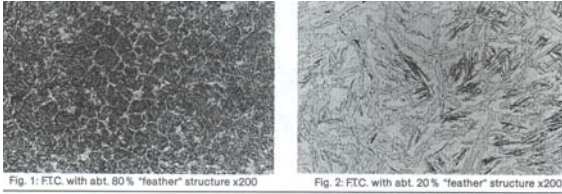


2/4_30FTC/70CS_GAS



รูปที่ 11 โครงสร้างของโลหะเชื่อม [4]

ชิ้นงานเชื่อมจริง
%Dilution CS/FTC < 10%



รูปที่ 12 โครงสร้างของลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง FTC จากผู้ผลิต [5]

3.1.2 การจำลองโลหะเชื่อมการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Simulated Hard Facing)

กระบวนการเชื่อมที่มีความเข้มข้นของปริมาณความร้อนซึ่งทำให้เกิดการหลอมนั้นมีความสูงจึงส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างจุลภาค [6] ในรูปที่ 11 ชิ้นงาน 1/1 มีเกรนที่ละเอียดกว่าชิ้นงานอื่นๆ อย่างไรก็ตามจากกระบวนการเชื่อมเดียวกันจะพบว่าชิ้นงาน 1/3 ที่บริเวณพื้นมีลักษณะของโครงสร้างรูปเข็มปนอยู่ (คล้ายกับลักษณะโครงสร้างมาร์เทนไซต์) ซึ่งแม้จะมีเกรนที่มีขนาดใหญ่ก็ตาม แต่โครงสร้างรูปเข็มจะส่งผลต่อความแข็งที่สูงกว่าชิ้นงาน 1/2 ซึ่งมีเกรนที่ขนาดเล็กกว่า (ค่าความแข็งแสดงใน

ตารางที่ 3)

สำหรับกระบวนการเชื่อมแก๊สนั้น การเจือจางลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง FTC ด้วยปริมาณเหล็กกล้าคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นทำให้โครงสร้างจุลภาคมีปริมาณของอนุภาค (อาจจะเป็นทั้งสแตนคาร์ไบต์) ลดลง โดยจะสังเกตได้จากลักษณะของเกรนที่ขนาดจะใหญ่ขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อความแข็ง โดย

ตารางที่ 3 แสดงให้เห็นถึงปริมาณลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง FTC ที่มีการเจือจางด้วยวัสดุอื่นในปริมาณที่น้อย จะมีโครงสร้างที่มีทั้งสแตนคาร์ไบต์มาก ทำให้ความแข็งที่วัดได้สูงขึ้นเช่นกัน

เมื่อนำชิ้นงานจากกระบวนการเชื่อมแก๊สที่จำลองได้และจากชิ้นงานเชื่อมจริง มาเปรียบเทียบกับโครงสร้างจุลภาคของงานเชื่อมจริงที่แสดงโดยผู้ผลิตลวดเชื่อม ดังรูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่จำลองได้และชิ้นงานเชื่อมจริงในรูปที่ 11 พบว่าชิ้นงาน 2/2 และ 2/4 มีปริมาณลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง FTC 70% และ 30% ตามลำดับพบว่าโครงสร้างคล้ายกับโครงสร้างของลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง FTC จากผู้ผลิตที่ปริมาณลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง FTC ประมาณ 80% และ 20% ตามลำดับ

จากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะเชื่อมพบว่าเมื่อมีการเจือจางลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง FTC ด้วยเหล็กกล้า

คาร์บอนในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้โครงสร้างจุลภาคที่ได้เปลี่ยนแปลงไป

3.2 ปริมาณเฟอร์ไรต์ (Ferrite Content)

ปริมาณเฟอร์ไรต์ของชิ้นงานทดสอบแสดงในตารางที่ 2 โดยจะเปรียบเทียบกับค่าจากการทำนายโดยใช้แผนภูมิ Scheffler Diagram ในชิ้นงานทดสอบที่ 1-15 (การจำลองโลหะเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิม)

ตารางที่ 2 ปริมาณเฟอร์ไรต์ของชิ้นงานทดสอบ

No	Dilution	Mea. %Ferrite	Pre. %Ferrite	Error
1	100SS304	5.5	4	1.5
2	100ER309	8.3	11	-2.7
3	100ER308L	6	8	-2
4	100ER316	5.5	5	0.5
5	100ER347	3.7	6	-2.3
6	50ER347/50ER308L	4.8	7	-2.2
7	50ER347/50ER316	6.4	5.5	0.9
8	50ER347/50SS304	3	5	-2
9	50ER308L/50SS304	5.7	7	-1.3
10	50ER308L/50SS309	8.5	10	-1.5
11	100ER70S	70.1	N/A	N/A
12	50ER70S/50ER316	50.8	N/A	N/A
13	50ER70S/50SS304	55.4	N/A	N/A
14	70ER70S/30SS304	60.7	N/A	N/A
15	30CS/70SS304	51.5	N/A	N/A
16	100FTC/0CS	12.56	N/A	N/A
17	70FTC/30CS	17.94	N/A	N/A
18	50FTC/50CS	32.32	N/A	N/A
19	30FTC/70CS	47.72	N/A	N/A
20	100FTC/0CS	21.3	N/A	N/A
21	70FTC/30CS	39.04	N/A	N/A
22	50FTC/50CS	62.48	N/A	N/A
23	30FTC/70CS	75.9	N/A	N/A
24	< 10%	12.04	N/A	N/A

หมายเหตุ : Mea. = Measured Pre. = Predicted

ตารางที่ 3 ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ

Sample No.	% Dilution FTC/CS	HV	Process
16	100FTC/0CS	1027.2	GTAW
17	70FTC/30CS	591.2	GTAW
18	50FTC/50CS	741.6	GTAW
19	30FTC/70CS	854.6	GTAW

20	100FTC/0CS	727.4	GAS
21	70FTC/30CS	640.4	GAS
22	50FTC/50CS	307.2	GAS
23	30FTC/70CS	221.2	GAS
24	< 10%	523	GAS*

หมายเหตุ : * ชี้นงานเชื่อมจริง

การวัดปริมาณเฟอร์ไรต์สามารถทำได้โดยการอาศัยคุณสมบัติทางแม่เหล็กของเฟอร์ไรต์ ในกรณีของการทำนายปริมาณเฟอร์ไรต์ด้วย Schaeffler Diagram จะอาศัยส่วนผสมทางเคมีของวัสดุเพื่อระบุตำแหน่งบนไดอะแกรม เพื่อใช้ในการทำนายปริมาณเฟอร์ไรต์ที่จะเกิดขึ้นในโลหะเชื่อม

ความคลาดเคลื่อนของปริมาณเฟอร์ไรต์ที่มาจากการทดลองเทียบกับจากการทำนาย อาจจะได้จากหลายสาเหตุ ไม่ว่าจะเป็นมาจากส่วนผสมทางเคมีโดยรวมของวัสดุที่นำมาทดลองที่ต่างชนิดกัน เมื่อวัสดุเกิดการหลอมรวมกัน ส่วนผสมโดยรวมอาจจะมีความแตกต่างกันไม่มากนัก แต่ในบริเวณที่ทำการวัดปริมาณเฟอร์ไรต์นั้นอาจเป็นบริเวณที่ส่วนผสมมีความแตกต่างกันจนส่งผลให้ค่าปริมาณเฟอร์ไรต์ที่วัดได้แตกต่างจากปริมาณเฟอร์ไรต์ที่วัดได้โดยรวมของชิ้นงานทดสอบ หรืออาจเกิดจากอัตราการเย็นตัวของแม่พิมพ์ทองแดงขนาดเล็กมีค่าแตกต่างจากอัตราการเย็นตัวที่ใช้ในการสร้าง Schaeffler Diagram ซึ่งเป็นจุดอ่อนของการใช้ไดอะแกรมในการทำนายปริมาณเฟอร์ไรต์ ดังนั้นโดยทั่วไปจึงใช้ไดอะแกรมเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุและการกำหนดความเค้นอย่างคร่าว ๆ เท่านั้น โดยไม่สามารถนำมาใช้ในการกำหนดเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมได้อย่างแม่นยำ จำเป็นจะต้องทำการวัดปริมาณเฟอร์ไรต์เพื่อเป็นการยืนยันหลังการเชื่อม (หากกำหนดโดยมาตรฐานหรือผู้สั่งผลิต)

นอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมที่แข็งตัวนั้นยังอาจมีความไม่สม่ำเสมอในระหว่างการแข็งตัว ซึ่งจะทำให้ปริมาณเฟอร์ไรต์กระจายตัวอยู่ในโลหะเชื่อมอย่างไม่สม่ำเสมอ การวัดปริมาณเฟอร์ไรต์จะทำการวัดรอบหน้าตัดชิ้นงานจำนวน 5 จุดกระจายทั่วบริเวณ แล้วจึงนำมาเฉลี่ย โดยอาศัยคุณสมบัติทางแม่เหล็กจึงมีความคลาดเคลื่อนได้ โดย

ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่หัวตรวจจับของ Ferrite Scope บนโลหะเชื่อม ซึ่งหากหัวตรวจจับอยู่ในตำแหน่งที่มีปริมาณเฟอร์ไรต์มาก ก็จะแสดงผลว่ามีปริมาณเฟอร์ไรต์มากเช่นเดียวกัน เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าเฉลี่ยหรือเพิ่มขนาดของหัวตรวจจับ จะช่วยในการวัดปริมาณเฟอร์ไรต์โดยรวม (Bulk Ferrite Content) ได้ดียิ่งขึ้น

ในกรณีของการผสมเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเฉพาะชิ้นงานทดสอบที่ 11-15 ปริมาณเฟอร์ไรต์จะมีค่าสูงเมื่อเทียบกับกรณีของเหล็กกล้าไร้สนิม ทั้งนี้เนื่องจากโดยพื้นฐานแล้วโลหะเชื่อมของเหล็กกล้าคาร์บอนจะเป็นเฟอร์ไรต์ และของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการทดลองนี้จะเป็นออสเทนไนต์ซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณเฟอร์ไรต์ที่สามารถวัดได้เมื่อปริมาณของโลหะเชื่อมของเหล็กกล้าคาร์บอนเพิ่มขึ้น ปริมาณเฟอร์ไรต์ที่วัดได้จะสูงขึ้น ดังแสดงใน

ตารางที่ 3

ในกรณีของชิ้นงานทดสอบเมื่อมีการเค้นจางลวดเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับชิ้นงานที่ 16-23 ในสัดส่วนที่ปริมาณการเค้นจางที่เพิ่มขึ้นนั้น ปริมาณเฟอร์ไรต์ที่วัดได้จากกระบวนการเชื่อมทิก และกระบวนการเชื่อมแก๊สมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเหล็กกล้าคาร์บอนมีปริมาณเฟอร์ไรต์ที่สูง เมื่อมีการเค้นจางด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ปริมาณเฟอร์ไรต์ที่วัดได้มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน

เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนความเค้นจางที่เท่ากันในกรณีการเชื่อมพอกผิวแข็ง ปริมาณเฟอร์ไรต์จากกระบวนการเชื่อมแก๊สมีปริมาณเฟอร์ไรต์ที่มากกว่าจากกระบวนการเชื่อมทิก อันเนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวของวัสดุที่ถูกหลอม โดยกระบวนการเชื่อมทิก มีความเข้มของปริมาณความร้อน [7] ที่สูงกว่ากระบวนการเชื่อมแก๊สทำให้ระยะเวลาที่ทำให้เกิดการหลอมสั้น ในขณะที่เดียวกันระยะเวลาการเย็นตัวก็สั้นด้วยเช่นกัน ซึ่งทำให้การเกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์น้อย แต่ในกระบวนการเชื่อมแก๊สมีความเข้มของปริมาณความร้อนที่ต่ำกว่ากระบวนการเชื่อมทิก ทำให้ระยะเวลาที่จำเป็นในการหลอมนั้นยาวนานกว่ากระบวนการเชื่อมทิก ในขณะเดียวกัน

ระยะเวลาการเย็นตัวก็นานด้วยเช่นกัน โดยจะทำให้เกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์เพิ่มมากขึ้น

สำหรับชิ้นงานเชื่อมจริงจากระบวนการเชื่อมแก๊ส จะมีการเจือจางด้วยวัสดุอื่นในสัดส่วนที่น้อยมาก เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานในกระบวนการเชื่อมแก๊ส ในชิ้นงานทดสอบที่มีการเจือจางด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนในปริมาณที่น้อย พบว่าปริมาณเฟอร์ไรต์ที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันกับชิ้นงานเชื่อมจริง

3.3 เปรียบเทียบการทำนายโครงสร้างจุลภาค (Comparison with Prediction Diagram)

จากทำนายปริมาณเฟอร์ไรต์ด้วย Schaeffler Diagram และการวัดปริมาณเฟอร์ไรต์ด้วย Ferrite Scope เปรียบเทียบกับโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะเชื่อมที่ได้พบว่าโลหะเชื่อมที่ไม่มีการเจือจาง โลหะเชื่อม 100ER308L มีปริมาณเฟอร์ไรต์จากการทำนายด้วย Schaeffler Diagram และการวัดปริมาณเฟอร์ไรต์ด้วย Ferrite Scope ประมาณ 8% และ 6% ตามลำดับ ซึ่งโครงสร้างจุลภาคมีพื้นเป็นออสเทนไนต์ และมีเฟอร์ไรต์ตรงบริเวณขอบเกรน

หากนำวัสดุตั้งแต่สองชนิดที่แตกต่างกันนำมาต่อกัน โดยการเชื่อมโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมสามารถทำนายได้โดยอาศัยเส้น Tie Line ดังตัวอย่างที่แสดงใน รูปที่ 7 (50ER347 กับ 50ER316) ปริมาณเฟอร์ไรต์สามารถทำนายที่จุดกึ่งกลางของเส้น Tie Line ที่เชื่อมต่อระหว่างส่วนผสมทั้งสองบน Schaeffler Diagram โดยผลการวัดปริมาณเฟอร์ไรต์ด้วย Ferrite Scope และจากการทำนายบนกึ่งกลางของเส้น Tie Line มีปริมาณเฟอร์ไรต์ 6.4% และ 5.5% ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองในตารางที่ 2 การทำนายและการวัดปริมาณเฟอร์ไรต์จะให้ผลที่สอดคล้องกัน

ในกรณีของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนเข้ากับเหล็กกล้าไร้สนิม สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกัน โดยมีโครงสร้างจุลภาคดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งเกิดจากการผสมระหว่าง 50ER70S กับ 50SS304 หากเพิ่มส่วนผสมของเหล็กกล้าเป็น 70% ก็จะมีปริมาณเฟอร์ไรต์มากขึ้น ซึ่งจากการ

วัดปริมาณเฟอร์ไรต์ด้วย Ferrite Scope ดังตารางที่ 2 พบว่ามีปริมาณเฟอร์ไรต์ที่สูงขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตามในกรณีนี้ Schaeffler Diagram ไม่เหมาะสมสำหรับใช้ทำนายปริมาณเฟอร์ไรต์ที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากถูกสร้างมาจากการทดลองที่เน้นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นหลัก จึงไม่เหมาะกับการใช้งานในเหล็กกล้าทั่วไป

3.4 ความแข็งโลหะเชื่อม (Weld Metal Hardness)

ความแข็งของโครงสร้างลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง FTC มาจากโครงสร้างที่มีปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นอยู่ในโครงสร้าง

จากตารางที่ 3 ในกระบวนการเชื่อมทิก ชิ้นงานที่ 16 โลหะเชื่อม 100FTC/0 CS มีความแข็งสูงสุด แสดงถึงปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีอยู่ในโครงสร้างโลหะเชื่อมที่มีอยู่ปริมาณมาก ส่วนชิ้นงานที่ 17 โลหะเชื่อม 70FTC/30CS ความแข็งที่วัดได้นั้นมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ 18 โลหะเชื่อม 50FTC/50CS และชิ้นงานที่ 19 โลหะเชื่อม 30FTC/70CS ทั้งนี้เนื่องจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ในชิ้นงานที่ 17 อาจได้รับความร้อนที่ใช้ในการหลอมที่สูงพอที่จะทำให้ทั้งสแตนคาร์ไบด์สลายและละลายไปในโครงสร้างโลหะเชื่อม โดยความแข็งที่เหลืออยู่เป็นความแข็งที่มาจากเหล็กกล้าคาร์บอนที่เจือจางเข้าไป ซึ่งหากเทียบกับค่าความแข็งของชิ้นงานที่ 19 ที่มีปริมาณเหล็กกล้าคาร์บอนเจือจางสูงทำให้วัดค่าความแข็งได้สูงเช่นกัน

โลหะเชื่อมที่ทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊ส เมื่อมีการเจือจางลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง FTC ด้วยเหล็กกล้าคาร์บอน ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นนั้นพบว่าค่าความแข็งที่วัดได้มีค่าต่ำลงเนื่องจากลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง FTC ถูกเจือจางด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นนั่นเองดังตารางที่ 3 ทั้งนี้ปริมาณความร้อนจากการเชื่อมแก๊ส (อุณหภูมิของเปลวเชื่อมแก๊สบริเวณเปลวขึ้นในประมาณ 3100 °C และกระบวนการเชื่อมทิกมีอุณหภูมิประมาณ 9726 °C ที่บริเวณปลายเปลวอาร์ค 5 มิลลิเมตร [8]) อาจไม่สูงพอที่จะทำให้คาร์ไบด์สลายและละลายลงในโครงสร้างโลหะเชื่อม ทำให้ความแข็งที่วัดได้ประกอบด้วยความแข็งจากคาร์ไบด์เป็นหลัก นอกจากนี้ลวดเติม FTC ยังถูกออกแบบให้ใช้กับกระบวนการเชื่อมแก๊สเป็น

หลัก จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้โดยกระบวนการเชื่อมทิก ซึ่ง จะให้ความแข็งแรงที่ต่ำกว่า

หากเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบกับ ชิ้นงานเชื่อมจริงในปริมาณการเจือจางลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง FTC ด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนในปริมาณที่ใกล้เคียงกันพบว่า พบว่าค่าความแข็งแรงที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานเชื่อมจริง

สรุปผลการทดลอง

1. การหลอมโลหะเชื่อมในแม่พิมพ์ทองแดงขนาดเล็ก สามารถจำลองโลหะเชื่อมที่มีโครงสร้างจุลภาคและ คุณสมบัติใกล้เคียงกับโครงสร้างจุลภาคที่มาจากชิ้นงานเชื่อมจริง

2. ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมมี อิทธิพลต่อการทำนายปริมาณเฟอร์ไรต์ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ Schaeffler Diagram ที่อยู่กับปริมาณโครเมียมเทียบเท่า (chromium equivalent; Cr_{eq}) และกลุ่มปริมาณนิกเกิลเทียบเท่า (nickel equivalent; Ni_{eq}) มาช่วยในการทำนายปริมาณเฟอร์ไรต์

3. เมื่อพิจารณาความเจือจางของโลหะเชื่อม ปริมาณเฟอร์ไรต์ที่วัดได้นั้นจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของ วัสดุที่นำมาผสมกัน ซึ่งสามารถทำนายได้จาก Schaeffler Diagram โดยอาศัยหลักการของเส้น Tie Line ที่ต่อจุดของ ส่วนผสมของวัสดุที่นำมาผสมกันบน Schaeffler Diagram

4. กระบวนการเชื่อมส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของ โลหะเชื่อม ซึ่งเป็นผลเนื่องจากปริมาณความร้อนที่ทำให้เกิด การหลอมของวัสดุ ดังเช่นกรณี Hardfacing หากใช้ปริมาณ ความร้อนในการหลอมวัสดุนั้นสูง จะไปทำให้ทั้งสแตนคาร์ไบด์ นั้นสลายตัว ให้ความแข็งแรงต่ำลง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อ การสึกกร่อนของงานเชื่อมพอกผิวแข็ง

5. เมื่อพิจารณาความเจือจางของโลหะเชื่อม ปริมาณลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง FTC ที่ลดลงจะส่งผลต่อค่า ความแข็งแรงของโลหะเชื่อม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขา วิศวกรรมเชื่อมที่สนับสนุนสถานที่ทำการวิจัย ขอขอบคุณ บริษัท เอ็ม เอส เทคดิง อ้อ อ้าว ังวง เจียซัง จำกัด ที่เอื้อเฟื้อ วัสดุในการทำแม่พิมพ์ทองแดงขนาดเล็กที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณอาจารย์อาวูธ สนใจยุทธ ที่ให้คำปรึกษาและ ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีซ่อมบำรุงรักษา สำนักวิจัยและ บริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่เอื้อเฟื้อห้องวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lippold, J.C., and Kotecki., D.J., 2005. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, John Wiley & Sons Inc., USA.
- [2] "Carbon Steel to Austenite Steel" Online [Http://www.gowelding.com/met/diss.html](http://www.gowelding.com/met/diss.html)
- [3] D. Klobca, B. Taljai, and J. Tusek. (2004). "Finite element modeling of GTA weld surface applied to hot-work tooling". Computational Materials Science 31: 368-378
- [4] นพกร ภูระยา, อิศรทัต พึ่งอิน. (2550) . ความ เป็นไปได้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะ เชื่อมจากแม่พิมพ์ทองแดงขนาดเล็ก. การประชุมทาง วิชาการเทคโนโลยีการขึ้นรูปวัสดุ ครั้งที่ 5
- [5] Welding Consumables & Welding Equipments. Star Nation Universal Co., Ltd.
- [6] นพกร ภูระยา, อิศรทัต พึ่งอิน. (2550) . การศึกษา โลหะเชื่อมของลวดเชื่อมพอกผิวแข็งโดยการจำลอง ทางกายภาพ. การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัย รังสิต
- [7] A.R. Trueman, D.P. Schweinsberg, and G.A. Hope. (1998). "A study of the effect of cobalt additions on the corrosion of tungsten carbide/carbon steel metal matrix composites". Corrosion Science 41:1377-1389.

[8] Welding Handbook Volume 1, "Welding Science and Technology" p.60, 69.