



รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง

การศึกษาความสามารถในการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองาน
เย็น SKD 11

A study of the repaired Weldability for Cold Work
Tool Steel



คณะผู้วิจัย

นายณัฐศักดิ์

สุวรรณนที

นายฤทธิชัย

เกาเนียม

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
งบรายได้ประจำปี 2563

การศึกษาความสามารถในการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11

งบรายได้ประจำปี 2563





รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง

การศึกษาความสามารถในการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น
SKD11

A study of the repaired Weldability for Cold Work Tool
Steel SKD 11



คณะผู้วิจัย

นายณัฐศักดิ์
นายฤทธิชัย

สุวรรณนที
เกาเนียม

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณรายได้ประจำปี 2563

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กิตติกรรมประกาศ

ในการทางานวิจัยเรื่อง การศึกษาความสามารถในการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 The study of the Weldability for Cold Work Tool Steel Type นี้ สามารถดำเนินการจนสำเร็จได้ด้วยดี ดังนั้นคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยงบรายได้ประจำปี 2563 ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สามารถดำเนินการ และบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตความแม่นยำสูงและสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ในการทดลอง ทำให้การทดลองสามารถดำเนิน การไปได้อย่างราบรื่น

สุดท้าย คณะผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอน จนทำให้คณะผู้วิจัยมีโอกาสในการทำวิจัยนี้ นอกจากนั้นขอกราบขอบพระคุณทุกๆ ท่านที่มีความเกี่ยว ข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งคณะผู้วิจัยไม่ได้เอ่ยนามถึง ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบแต่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ



หัวข้องานวิจัย	การศึกษาความสามารถในการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11
ผู้เขียน	นายณัฐศักดิ์ สุวรรณนที นายฤทธิชัย เกาเนียม
สาขาวิชา	สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตความแม่นยำสูง
คณะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีพ.ศ	2563

บทคัดย่อ

ปัจจุบันกระบวนการเชื่อมซ่อมแซมชิ้นส่วนที่ชำรุดเสียหายสามารถลดต้นทุนและเวลาได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามอาจเกิดการแตกร้าวระหว่างการเชื่อมได้โดยเฉพาะการแตกร้าวขณะเนื้อเชื่อมแข็งตัว (Weld Solidification Crack) อันเนื่องมาจาก ขั้นตอนกำหนดปฏิบัติงานเชื่อมที่ไม่เหมาะสม ซึ่งมีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนซ่อมแซมลดลง

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้วิธีที่เหมาะสมการเชื่อมซ่อมและวิเคราะห์ลักษณะรอยแตกร้าวจากการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้คือ เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ถูกเชื่อมด้วยกระบวนการอาร์กทั้งสแตนแก๊สเฉื่อยปกคลุมแบบไม่เติมสวดบน ชิ้นงานร่วมกับการทดสอบทรานส์วาเรสเตรนด้วยระดับความเครียดต่างกัน จากนั้นชิ้นงานจากถูกทำการวัดขนาดความยาวรอยแตกร้าว นับจำนวนรอยแตกร้าว และวัดอัตราการเย็นตัวจากการเชื่อมโดยการจุ่มเทอร์โมคัปเปิลลงในบ่อหลอมขณะเชื่อม ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยแตกกับอุณหภูมิการเย็นตัว โดยสามารถสร้างเป็นเส้นโค้งความเหนียวที่อุณหภูมิสูง (High Temperature Ductility Curve) อย่างไรก็ตามความไวในการแตกร้าวขณะแข็งตัวเชิงปริมาณจะถูกประเมินผ่านเส้นโค้งความเหนียวของการแตกร้าวขณะแข็งตัวของวัสดุที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการตัดแนวเชื่อมเพื่อนำไปส่องโครงสร้างจุลภาคและการทดสอบความแข็งแรงด้วยเครื่องวิเคเกอร์ โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

จากผลการทดลองและวิเคราะห์พบว่า การที่มีแรงกระตุ้นจากภายนอกหรือการออกแบบรูปร่างบาร่องในการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าเครื่องมือ อาจมีทำให้ชิ้นงานเกิดความเครียดสูงในขณะการเชื่อมซ่อมการเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ส่งผลทำให้มีความไวในการแตกร้าวที่เร็วขึ้นในขณะเชื่อมซ่อมเหล็กประเภทเครื่องมือ ประกอบกับที่ระดับความเครียดสูงมีความกว้างของเส้นโค้งความเหนียวที่อุณหภูมิสูงกว้างมากกว่าความเครียดอื่น

คำสำคัญ : การเชื่อมซ่อม เหล็กกล้าเครื่องมือ การเชื่อมอาร์กทั้งสแตน การทดสอบทรานส์วาเรสเตรน

Title A study of the repaired Weldability for Cold Work Tool Steel SKD 11

Auther Mr.Nattasak Suwannatee
Mr. Rittichai Phaoniam,

Department Department of High Precision Engineering Engineering

Faculty Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology
Krungthep

B.E. 2020

Abstract

Nowadays, although welding process of damaged parts can help to reduce cost and time consumption, there may be cracking, especially weld solidification crack, occurred during welding due to improper welding procedures. Such cracking may affect to reduction of useful life of repaired parts.

Therefore, the purpose of this research was to apply the appropriate repaired welding means and analyze cracking from a repaired welding of tool steel SKD 11. The materials in this experiment was a tool steel SKD 11 and it was welded by Autogenous gas metal are welding on specimens. The specimens were tested with Trans-Varestraint Test during welding in the level of differenced strain, the length of cracks will be measured and counted. Then, cooling rate from welding was found by dipping thermocouple in molten pool. Accordingly, the relationship between the length of crack and cooling temperature was obtained that could be created as high temperature ductility curve. Quantitative solidification cracking was evaluated through high temperature ductility curve of solidification cracking of materials. The specimens were examined a metallurgical structures. The results can be summarized as follows.

The experimental results can be summarized that there are the strain from external load to specimens during repaired welding in tool steel SKD 11. It rapidly promoted the sensitivity cracking on specimens in high carbon steel or tool steel and another reason of the high level of strain, there is the width of High Temperature Ductility Curve to effect on cracking susceptibility more than other strain.

Keywords repaired welding, tool steel, gas metal are welding, Trans-Varestraint Test

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การทบทวนวรรณกรรม	3
2.2 กลไกการแตกร้าาขณะร้อน (Hot Cracking Mechanism)	5
2.3 รูปแบบการทดสอบความไวต่อการแตกร้าาขณะร้อน	5
2.4 กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสปีคคูลัม Gas Tungsten Arc Welding: GTAW)	9
2.5 แก๊สสปีคคูลัมที่ใช้กับการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสปีคคูลัม	12
2.6 ส่วนประกอบในบริเวณรอยเชื่อม	13
2.7 การทดสอบสมบัติทางกล	17
2.8 ทฤษฎีการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา	19
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	22
3.1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย	23
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	23
3.3 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค	29
3.4 ขั้นตอนการทดสอบความแข็ง	31
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	33
4.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบรอยการแตกร้าา	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการตรวจวัดประเมินอัตราการเย็นตัวของบ่อหลอม	37
4.3 ผลการตรวจสอบวิเคราะห์ทางโครงสร้างจุลภาค	43
4.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงแบบจุลภาค	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	46
5.1 สรุปผลการทดลอง	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	46
เอกสารอ้างอิง	47
ประวัตินักวิจัย	48



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การเลือกใช้แก๊สปกคลุมให้เหมาะสม	13
2.2	รายละเอียดของน้ำยากัดขึ้นตรวสอบที่เป็นเหล็ก	21
3.1	ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก %)	23
3.2	เงื่อนไขตัวแปรการเชื่อม	28
3.3	ขนาดแผ่นรองของรัศมี Bending Block	28
3.4	สูตรกักรวดของเหล็กSKD11	31
4.1	ความเครียดในแต่ละรัศมี Bending Block	39
4.2	อัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมของเหล็กกล้า SKD11	42



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	การทดสอบความไวต่อการแตกแบบ Houldcroft	6
2.2	การทดสอบความไวต่อการแตกด้วย Varestraint Test	6
2.3	การทดสอบด้วยวิธี Trans-Varestraint test	7
2.4	รอยแตกร้าวภายหลังทดลองด้วยเครื่อง Trans-Varestraint Test	8
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยแตกกับอุณหภูมิการเย็นตัว	8
2.6	การสร้างเส้นโค้งความเหนียวของการแตกร้าวขณะแข็งตัว	9
2.7	เส้นโค้งความเหนียวของการแตกร้าวขณะแข็งตัวที่วัสดุแตกต่างกัน	9
2.8	การทำงานของเครื่องเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุม	10
2.9	ข้อแตกต่างของกระแสไฟเชื่อมทั้ง 3 ประเภท	11
2.10	การทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานด้วยกระแส DCEP	12
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างแผนภาพสมดุลกับบริเวณต่าง ๆ ที่เกิดในรอยเชื่อม	14
2.12	บริเวณที่ไม่ผสมใกล้ขอบรอยเชื่อม	16
2.13	ลักษณะหัวกดเพชรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมที่มีมุมปลายแหลม 136° และลักษณะรอยกดที่ได้จากการทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์	17
2.14	การหาค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมพื้นที่รอยกดเฉียง 136°	18
2.15	เครื่องอัดชิ้นงานขึ้นรูปแบบร้อน	19
2.16	การขัดกระดาษทราย	20
2.17	หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	21
3.1	ขั้นตอนแนวคิดของโครงการวิจัย	22
3.2	ชิ้นงานที่จะทำการทดสอบด้วย Trans-Varestraint Test	23
3.3	การทดสอบด้วย Trans-Varestraint Test	24
3.4	รอยแตกร้าวขณะแข็งตัวภายหลัง Trans-Varestraint Test	24
3.5	การพิจารณาในการวัดขนาดความยาวรอยแตกร้าวขณะแข็งตัวของรอยเชื่อม	24
3.6	วิธีการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลในบ่อหลอม	25
3.7	การสร้างเส้นโค้งความเหนียวในการแตกร้าวขณะแข็งตัวของวัสดุ	25
3.8	เส้นโค้งความเหนียวของการแตกร้าวขณะแข็งตัวที่วัสดุหลักแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน	26
3.9	เครื่องเชื่อม GTAW ที่ใช้ในการทดลอง	27
3.10	แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม	27
3.11	หลักการทำงานของชุดทดสอบ Trans-Varestraint Test	29
3.12	ขั้นตอนการขึ้นเรือนชิ้นงานตรวจสอบ	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.13	ขั้นตอนการขีดกระดาดทรายเบอร์ 240-1,200	30
3.14	ขั้นตอนการกัดกรดผิวหน้าขึ้นทดสอบ	30
3.15	การใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	31
3.16	ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแรงแบบไมโครวิกเกอร์	32
4.1	รอยแตกร้าวขณะแข็งตัวของเหล็กกล้า SKD11	33
4.2	จำนวนและความยาวรอยแตกร้าวขณะแข็งตัวของเหล็กกล้า SKD11 ที่ Bending Block R70	34
4.3	จำนวนและความยาวรอยแตกร้าวขณะแข็งตัวของเหล็กกล้า SKD11 ที่ Bending Block R125	35
4.4	เปรียบเทียบความยาวรอยแตกร้าวสูงสุด	36
4.5	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความยาวรอยแตกร้าวขณะแข็งตัวของเหล็กกล้าSKD 11 ในทุก ๆ รัศมี Bending block	36
4.6	อุปกรณ์เก็บข้อมูล (Data Logger)	37
4.7	การใช้สายเทอร์โมคัปเปิล Type R จุ่มลงไปในห้องเพื่อวัดอัตราการ เย็นตัว	38
4.8	การวัดอุณหภูมิอัตราการเย็นตัวของห้องจากการเชื่อมของเหล็กกล้า SKD11	38
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (C°) ต่อเวลา (S) ของอัตราการเย็นตัว	39
4.10	ค่าความเครียดต่อความยาวรอยแตกของเหล็กกล้า SKD11	40
4.11	อัตราการเย็นตัวห้องของเหล็กกล้า SKD11	41
4.12	ช่วงอุณหภูมิที่แตกร้าวของเหล็กกล้า SKD11	41
4.13	อัตราการเย็นตัวของห้องและช่วงอุณหภูมิที่แตกร้าวของเหล็กกล้า SKD11	41
4.14	เส้นโค้งความเหนียวในการแตกร้าวขณะแข็งตัวของเหล็กกล้า SKD11	43
4.15	การประมาณค่าขอบเขตช่วงอุณหภูมิเกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัวของ เหล็กกล้า SKD11	43
4.16	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า SKD 11 ที่กำลังขยาย 500 เท่า	44
4.17	โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระแทก 50 เท่า	44
4.18	โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้า SKD 11 ที่กำลังขยาย 500 เท่า	45
4.19	ค่าความแข็งแรงของเหล็กกล้า SKD11	45

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

GTAW	การเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding)
HAZ	บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone)
GMAW	กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding)
TIG	การเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas)
DCEN	กระแสตรงขั้วลบ (Direct current electrode negative)
DCEP	กระแสตรงขั้วบวก (Direct current Electrode Positive)
AC	กระแสสลับ (Alternating current)
Ar	แก๊สอาร์กอน
He	แก๊สฮีเลียม
SSGBs	ขอบเกรนย่อยจากการแข็งตัว (Solidification subgrain boundaries)
SGBs	ขอบเกรนจากการแข็งตัว (Solidification grain boundaries)
MGBs	ขอบเกรนเคลื่อนย้าย (Migrate grain boundaries)
gf	แรงกด (กรัม)
kgf	แรงกด (กิโลกรัม)
BTR	ในช่วงอุณหภูมิแข็งเปราะ (Brittle Temperature Range)
MCD	ความยาวรอยแตกกว้างสูงสุด (Maximum Cracking Distance)
SCTR	ช่วงอุณหภูมิเกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัว (Solidification Cracking Temperature Rang)
BM	บริเวณโลหะเชื่อม (Base Metal)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันงานเชื่อมมีบทบาทสำคัญในงานอุตสาหกรรม ใช้ในงานก่อสร้าง, อุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมการผลิตและการซ่อมแซมทั่วไปในการเชื่อมซ่อมแซมนั้นมีหลายปัจจัยที่ส่งผลให้แนวเชื่อมออกมาไม่สมบูรณ์ ทั้งการใช้ลวดเชื่อมไม่เหมาะสมหรือวัสดุที่ไม่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน จึงส่งผลให้เกิดความเสียหายต้องทำการซ่อมแซมอยู่บ่อยครั้ง งานเชื่อมจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญเกี่ยวกับการค้นคว้าวิจัยและพัฒนา คณะนักศึกษาจึงทำการทดสอบความสามารถของวัสดุเหล็กกล้าแต่ละชนิดที่ทนต่อการแตกร้าวขณะร้อนและหารอยบกพร่องที่เกิดจากแนวเชื่อมในเนื้อวัสดุแต่ละชนิดที่นำไปสู่สาเหตุของการแตกร้าว เพื่อหาวิธีป้องกันหรือขั้นตอนการเชื่อมที่ถูกต้องเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์

อุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีการก่อสร้างต่อเติมและซ่อมแซม ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเหล็กกล้าเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเหล็กกล้าเป็นวัสดุที่มีธาตุผสมหลักคือคาร์บอน โครเมียม และโมลิบดีนัมซึ่งมีผลทำให้เกิดคุณสมบัติเด่นคือ ทนต่อการสึกหรอ ทนทานการกัดกร่อนได้ดีขึ้น อบอุ่นง่ายได้ความแข็งแรงสูง ในกรณีที่เหล็กกล้าที่ใช้งานแล้วเกิดการชำรุดเสียหายขึ้น การเชื่อมซ่อมบำรุงเป็นทางเลือกที่นิยมใช้อย่างมาก เนื่องจากช่วยลดต้นทุนและเวลาในการใช้อะไหล่ทดแทน อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่ากรรมวิธีงานเชื่อมจะเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูง แต่หากการเชื่อมมีขั้นตอนปฏิบัติหรือกำหนดปัจจัยงานเชื่อมที่ไม่เหมาะสมแล้ว รอยเชื่อมซ่อมแซมดังกล่าวอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อการลดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนได้ โดยเฉพาะวัสดุที่มีความสามารถในการเชื่อมต่ำ (Weldability) จากการศึกษาที่ผ่านมาได้มีการรายงานผลเกี่ยวกับการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับงานแม่พิมพ์ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมต่างๆ เช่นในการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสติกคูลม (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) กล่าวคือการประเมินความไวในการแตกร้าวขณะแข็งตัวเชิงปริมาณเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดวิกฤตและอุณหภูมิต่างๆในการแตกร้าวขณะแข็งตัวหรือเรียกว่าเส้นโค้งความเหนียวในการแตกร้าว (Ductility Curve of Weld Metal Solidification Cracking) โดยหากอัตราความเครียดของแนวเชื่อมขณะแข็งตัวเกินกว่าเส้นความเหนียวในการแตกร้าว ก็จะทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้นนั่นเอง

ดังนั้นจึงการศึกษาความสามารถในการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดข้อปฏิบัติงานเชื่อมซ่อมบำรุงที่เหมาะสมในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อประยุกต์ใช้วิธีที่เหมาะสมการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ลักษณะรอยแตกร้าวจากการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ชิ้นงานทดสอบเป็นเหล็กกล้า SKD11

- 1.3.2 ในการศึกษากำหนดวิธีการทดสอบเป็น Transverse-Varestraint Test และกรรมวิธีการเชื่อม TIG welding
- 1.3.3 ทดสอบหาความสัมพันธ์เส้นโค้งความเหนียวในการแตกร้าาขณะร้อน เพื่อใช้ประเมินความไวในการแตกร้าาขณะแข็งตัวเชิงปริมาณในรอยเชื่อมของเหล็กกล้า SKD11
- 1.3.4 ทดสอบและวิเคราะห์ผลกระทบทางโครงสร้างจุลภาคในเนื้อเชื่อมและบริเวณกระทบร้อน
- 1.3.5 ทดสอบหาความแข็งของเนื้อเชื่อมและบริเวณกระทบร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงปัจจัยการเชื่อมที่มีผลกระทบต่อสมบัติความแข็งของเหล็กกล้า SKD11
- 1.4.2 เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและถ่ายทอดองค์ความรู้แก่อุตสาหกรรมการผลิตและอุตสาหกรรมการเชื่อมซ่อมแซมชิ้นส่วน
- 1.4.3 เพื่อจัดเตรียมข้อมูลวิธีการและผลการทดลองเบื้องต้น ที่สามารถนำเสนอให้แก่ภาคธุรกิจ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อทำการผลิตได้ทันที
- 1.4.4 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและปรับปรุงกระบวนการผลิตให้เหมาะสมกับอุตสาหกรรมการผลิต เพื่อให้ได้มาซึ่งผลผลิตที่คุ้มค่าและลดต้นทุนในการผลิต
- 1.4.5 ได้เรียนรู้พื้นฐานในงานเชื่อม เพื่อเผยแพร่ในวงการศึกษาและมีโอกาสในการประยุกต์ใช้ในอนาคตต่อไป



บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทบทวนวรรณกรรม

สมหมาย สารมาท และ วิชัย ฉัตรทิพนวณ [1] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกร้าวในแนวเชื่อมสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 เพื่อหารูปแบบและข้อกำหนดวิธีปฏิบัติในกระบวนการเชื่อมแบบ GTAW ซึ่งพบปัญหารอยแตกร้าวหลังจากการเชื่อมเพื่อซ่อมแซมโดยนำเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มจำนวน 24 เพื่อกรองปัจจัย 4 ปัจจัย คือ กระแสไฟเชื่อมความเร็วในการเชื่อมมุมแกนลวดทั้งสแตนเลสและอุณหภูมิอุณหภูมิขึ้นงานก่อนการเชื่อมโดยมีผลตอบเป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวซึ่งมีขอบเขตจำกัดของค่าคุณลักษณะจึงได้นำวิธีการแปลงข้อมูลผลตอบก่อนการวิเคราะห์ผล โดยวิธีที่เหมาะสมคือ Arcsiny ส่งผลให้ข้อมูลใหม่มีการกระจายตัวเป็นแบบปกติหรือใกล้เคียงมากขึ้นค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของข้อมูลที่แปลงแล้วเป็นอิสระต่อกัน จากนั้นใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าระดับที่ดีที่สุดของแต่ละปัจจัย ผลการศึกษาพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ที่สามารถควบคุมการแตกร้าวในแนวเชื่อมได้คือ การปรับค่ากระแสไฟเชื่อมที่ 175 แอมแปร์ความเร็วในการเชื่อมที่ 200 เซนติเมตรต่อนาทีอุณหภูมิอุณหภูมิขึ้นงานก่อนการเชื่อมที่ 450 องศาเซลเซียสและในส่วนของมุมแกนลวดทั้งสแตนเลสและสแตนเลสไม่มีผลต่อการแตกร้าวในแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญจากการทดลองยืนยันผลเพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นพบว่าไม่ปรากฏรอยแตกร้าวในแนวเชื่อมจากการตั้งค่าวิธีปฏิบัติงานดังกล่าว

เปรม บัวแก้ว, เอกชัย วารินศิริรักษ์ และอิศรทัต พึ่งอัน [2] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่แท้จริงของการแตกร้าวในแนวเชื่อม ในงานซ่อมบำรุงแม่พิมพ์ฉีดซึ่งทำจากวัสดุ SKD 11 เพื่อให้ผลของการวิจัยสามารถนำไปแก้ปัญหาได้ในอุตสาหกรรมจริง กระบวนการเชื่อมอาร์กพลาสมาแบบการควบคุมด้วยมือถูกใช้ในงานทดลอง โลหะป้อนเติมสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือชนิด 5% โครเมียมขนาด 1.0 มิลลิเมตร ใช้ในการจำลองการเชื่อมเสริมเนื้อขนาดเล็ก ความเร็วในการเชื่อมควบคุมให้อยู่ในช่วง 2 ถึง 5 เซนติเมตรต่อนาที ด้วยช่วงเชื่อมที่มีทักษะสูง กระแสเชื่อมในการทดสอบประกอบด้วย 30, 40, 50 และ 60 แอมแปร์ ภายใต้การอุ่นขึ้นงานเชื่อม 300 องศาเซลเซียส การตรวจสอบหารอยแตกร้าวด้วยวิธีการทางโลหะวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ปรากฏรอยแตกร้าวในแนวเชื่อมที่ใช้กระแสเชื่อม 40 แอมแปร์ ลักษณะการแตกร้าวเป็นการแตกร้าวขณะแข็งตัว ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางรูปทรงของการแข็งตัว พบว่ารอยแตกร้าวอยู่ในบริเวณ Cellular Structure และแพร่กระจายผ่าน Dendritic Structure แต่หยุดอยู่บริเวณโครงสร้างแบบ Equiaxed Structure จากการวิเคราะห์กลไกการเกิด Cellular Structure ที่ทำให้เกิดการแตกร้าวนี้ มีผลมาจากการเชื่อมที่ทำให้สัดส่วนของ เกรเดียนส์ความร้อน (G) ต่ออัตราการแข่งขันตัว (R) มีค่าสูง (High G/R) ซึ่งความสัมพันธ์ของการเชื่อมกระแสต่ำด้วยการควบคุมด้วยมือเน้นยากต่อการควบคุม ทำให้ต้องหยุดการเดินอาร์กอยู่กับที่ เพื่อทำการป้อนลวดซ้ำให้ได้

ขนาดแนวเชื่อมที่ต้องการ ผลการค้นพบปรากฏว่าของปัญหาการแตกร้าวที่ซับซ้อนนี้ สามารถนำไปจัดทำเป็นเทคนิคในการเชื่อมที่ไม่เกิดการแตกร้าวได้จริง

Sindo Kou [3] การแตกร้าวขณะแข็งตัวสามารถเกิดขึ้นในบริเวณบ่อหลอมละลาย และบริเวณใกล้เคียงบางส่วนได้ในขณะที่ทำการเชื่อม ขณะที่ทำการเชื่อมโลหะบ่อหลอมละลายจะถูกรอบล้อมไปด้วยส่วนผสมของวัสดุ สำหรับทำเชื่อมที่แสดงในตัวอย่างคือ Circular-Patch ชิ้นงานประกอบไปด้วยชิ้นส่วนภายในในรูปแบบ Circular-Patch และชิ้นส่วนด้านนอกที่ติดตั้งด้วยน็อตอย่างแน่นหนา บริเวณบ่อหลอมละลายเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิในการเชื่อม หลังบ่อหลอมละลายเป็นวัสดุที่ยังแข็งตัวอยู่เรียกว่า บริเวณอ่อนซึ่งเป็นลักษณะประกอบ Dendrites (S) ที่อยู่หลังโซนอ่อนเป็นวัสดุที่ผลึกสมบูรณ์ที่เรียกว่า บริเวณรอยเชื่อมหรือเชื่อมโลหะ ในด้านหน้าและด้านหลังบ่อหลอมละลายจะหลอมละลายเกรนโลหะเป็นบางส่วนและของเหลวขอบเกรนที่จุดอุณหภูมิจะอยู่บนยูเทคติก อุณหภูมิของโลหะพื้นฐาน ที่อยู่ด้านหลังเกรนจะละลายบางส่วนด้านข้างบ่อหลอมละลายเป็นวัสดุที่แข็งตัวสมบูรณ์เรียกว่า หลอมละลายบางส่วน (PMZ) แสดงตัวอย่างของการแตกร้าวขณะแข็งตัวและการจัดการแตกร้าวด้วยวิธีการเชื่อม Circular-Patch ของอลูมิเนียม แสดงการแตกร้าวขณะแข็งตัวเกิดขึ้นมากน้อยแถวตรงกลางแนวเชื่อม

ยงยุทธ ดุลยกุล [4]งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน โดยกรรมวิธีการเชื่อมแม่เหล็ก จุดประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลของงานเชื่อมจากการใช้ชนิดของกระแสเชื่อมและส่วนผสมของแก๊สคลุมที่แตกต่างกัน วิธีการวิจัยใช้กรรมวิธีการเชื่อมแม่เหล็กแบบอัตโนมัติ ชิ้นงานทดลองเชื่อมเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ขนาดชิ้นงานรวม $200 \times 200 \times 10$ มิลลิเมตร ต่อชนทำราบ บากมุมร่องวี 60 องศา ทำการเชื่อมด้วยกระแสแบบมาตรฐานและแบบพัลส์ ใช้แก๊สอาร์กอนผสมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแก๊สคลุมขณะเชื่อม ด้วยส่วนผสมที่แตกต่างกัน 8 อัตราส่วน ผลของงานวิจัยจากลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างมหภาค การเชื่อมด้วยกระแสมาตรฐานที่แก๊สผสมทุกอัตราส่วนจะให้ลักษณะของแนวเชื่อมสมบูรณ์ว่าการเชื่อมด้วยแก๊สคลุม 100% CO₂ และให้ผลที่ดีกว่าการเชื่อมด้วยกระแสพัลส์ ในขณะที่โครงสร้างทางจุลภาคการเชื่อมด้วยกระแสทั้ง 2 ชนิด เมื่อใช้อัตราส่วนผสมของแก๊สอาร์กอนที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มองเห็นการแบ่งเขตระหว่างเนื้อเชื่อมกับบริเวณ HAZ ที่มีความแตกต่างกัน การหลอมละลายของเนื้อเชื่อมของแก๊สคลุมทุกอัตราส่วนสมบูรณ์ดี ส่วนผลของการทดสอบสมบัติทางกลของบริเวณเนื้อเชื่อม พบว่า การเชื่อมด้วยกระแสแบบมาตรฐาน ที่แก๊สผสมทุกอัตราส่วนจะให้ค่าความแข็งแรงและความเค้นที่จุดครากสูงกว่าการเชื่อมโดยใช้แก๊สคลุม 100% CO₂ ส่วนการเชื่อมด้วยกระแสพัลส์ทุกอัตราส่วนผสมของแก๊สคลุมจะให้ค่าความแข็งแรงและความเค้นที่จุดครากใกล้เคียงกัน เปรียบเทียบกระแสเชื่อม พบว่าการเชื่อมด้วยกระแสแบบมาตรฐานทุกอัตราส่วนผสมของแก๊สคลุมจะให้ค่าความแข็งแรงและความเค้นที่จุดครากสูงกว่ากระแสพัลส์ ส่วนค่าความแข็งแรงการเชื่อมด้วยกระแสทั้ง 2 ชนิดที่แก๊สคลุมทุกอัตราส่วนจะให้ความแข็งแรงค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยการเชื่อมด้วยกระแสแบบมาตรฐานที่แก๊สคลุมทุกอัตราส่วน จะให้ค่าความแข็งแรงเทียบบริเวณ HAZ สูงกว่าการเชื่อมด้วยกระแสพัลส์

เดช เหมือนขาว, ยงยุทธ ดุลยกุล และชัยยุทธ มิงาม [5] การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน โดยกระบวนการเชื่อมแพร่ ในการออกแบบกระบวนการเชื่อมแพร่โดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 โดยรอยต่อเกย ทำการเชื่อมด้วย

การแพร่โดยใช้อุณหภูมิ 750 850 และ 950 °C และทำการกดขึ้นงานโดยใช้ความกดดัน 20 MPa โดยใช้ เวลา 60 และ 90 นาที ผลการวิจัยพบว่าความแข็งแรงของรอยต่อจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และเวลา

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, สุรัตน์ ตรียวนพงศ์, สุริยา ประสมทอง และวราญา วัฒนจิตศิริ [6] งานวิจัยนี้มี จุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งเชื่อมอาร์กวดใต้ฟลักซ์เหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C ต่อสมบัติของการสึกหรอแบบขัดสี และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและสมบัติ ทางกลของโลหะเชื่อม ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การเพิ่มจำนวนชั้นพอกผิวแข็ง ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของโลหะเชื่อมมีค่าสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งส่งผลต่อการสูญเสียมวลของเนื้อโลหะ เชื่อมมีแนวโน้มลดลง การสึกหรอของผิวแนวเชื่อมที่สูญเสียมวลที่สูงมีลักษณะเป็นร่องลึกขนาดใหญ่ ขณะที่การสึกหรอที่สูญเสียมวลต่ำมีลักษณะการสึกหรอของผิวแนวเชื่อมมีลักษณะเป็นร่องขนาดเล็ก

2.2 กลไกการแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking Mechanism)

การแตกร้าวขณะร้อน (Hot cracking) มีหลายชนิด รอยแตกร้าวมักเกิดขึ้นตรงกลางรอยเชื่อม ขณะกำลังแข็งตัว (Solidification Temperature Range) ขณะเชื่อมสังเกตเห็นได้ทันทีสาเหตุการ แตกร้าวมีหลายทฤษฎีแต่ที่ยอมรับกันแพร่หลายก็มีปัจจัยอยู่ 2 ประการคือ 1. Weld Metal Composition หรือส่วนผสมของวัสดุ เช่น S, P, B ซึ่งเป็นธาตุมีจุดหลอมเหลวต่ำไปรวมตัวกันที่ขอบ เกรน ทำให้ไวต่อการแตกร้าวขณะร้อนมากขึ้น สืบเนื่องจากคุณสมบัติ P, S ไม่ควรเกิน 0.03% ส่วนธาตุ อื่นๆที่มีความสามารถในการชุบแข็ง เช่น ซิลิคอน เครื่องจักรที่มีคาร์บอนสูง ต้องพิจารณาเป็นพิเศษ ปัจจัยที่ 2 คือ ด้าน Mechanical เกี่ยวกับการแรงดึงรั้ง (Driving Force หรือ Shrinkage Strains) ของ Weld Bead ขณะเชื่อม ถ้ามากเกินไปจะขัดจำกัดของเนื้อเชื่อม ณ อุณหภูมิ กำลังแข็งตัวก็เป็นเหตุให้ แตกร้าวได้ เช่น รอยต่อที่มีสัดส่วนความสูงต่อความกว้างมากๆ (D/W) เช่น Narrow Gap Joint, Pear Shape Weld หรือรอยต่อที่มีการยึดหยุ่นตัวน้อย เช่น เชื่อมงานหนา ๆ เป็นต้น หรือเชื่อมด้วยความเร็ว สูง Heat Input ต่ำ ๆ เป็นต้นแนวทางป้องกันเชิงปฏิบัติคือ

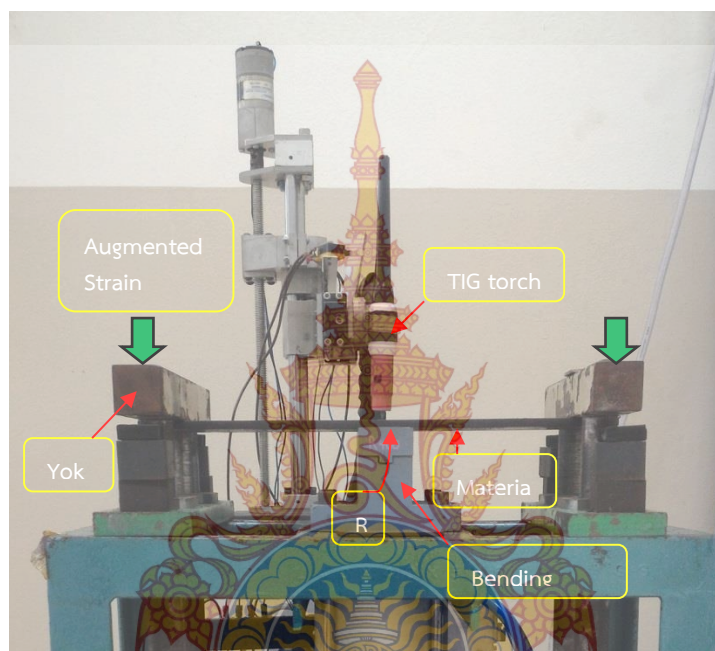
1. การเลือกชนิดลวดเชื่อมที่เจือจาง (Dilution) ส่วนผสมของ Base Metal ที่เสี่ยงต่อการ แตกร้าวก็เป็นทางเลือกหนึ่ง แต่ต้องคงสมบัติอื่นๆที่ต้องการไว้ได้ ซึ่งต้องใช้ความรู้ทางโลหะวิทยาเข้า ช่วย
2. เชื่อมแนวเชื่อมให้มี D/W ต่ำ ๆ
3. การทำ pre heating

2.3 รูปแบบการทดสอบความไวต่อการแตกร้าวขณะร้อน

การทดสอบความไวต่อการแตกร้าวขณะร้อน (Tests for Hot Cracking Susceptibility) ปัจจุบัน วิธีการทดสอบของการแตกร้าวขณะแข็งตัวได้รับการพัฒนาเพื่อประเมินความสามารถในการเชื่อมใน หลายวัสดุ วิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย

- 1) การทดสอบ Houldcroft, FISCO ทดสอบแตกร้อนและการทดสอบแพทช์วงกลม ภาพที่ 2.1 แสดงให้เห็นขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความไวต่อการแตกแบบ Houldcroft ซึ่งมักจะถูกนำมาใช้ ในอูมิเนียม

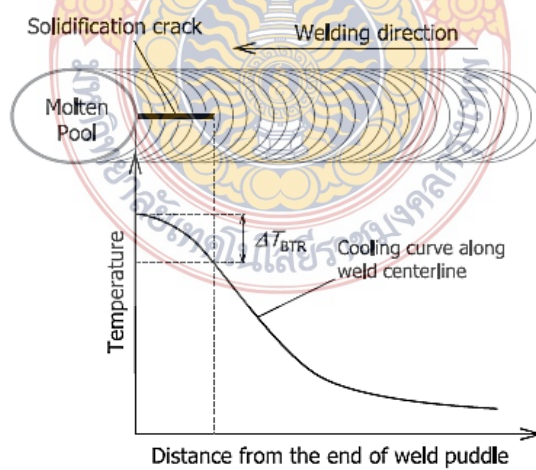
รอยแตกและอัตราการเย็นตัวการเชื่อมการถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยแตกกับอุณหภูมิการเย็นตัวดังแสดงในภาพที่ 2.5 ซึ่งสามารถสร้างเส้นโค้งความเหนียวของการแตกร้าขณะแข็งตัวจากความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยแตก อุณหภูมิการเย็นตัว ระดับความเครียดดังภาพที่ 2.6 โดยความไวในการแตกร้าขณะแข็งตัวเชิงปริมาณจะถูกประเมินผ่านเส้นโค้งความเหนียวของการแตกร้าขณะแข็งตัวของวัสดุที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 2.7



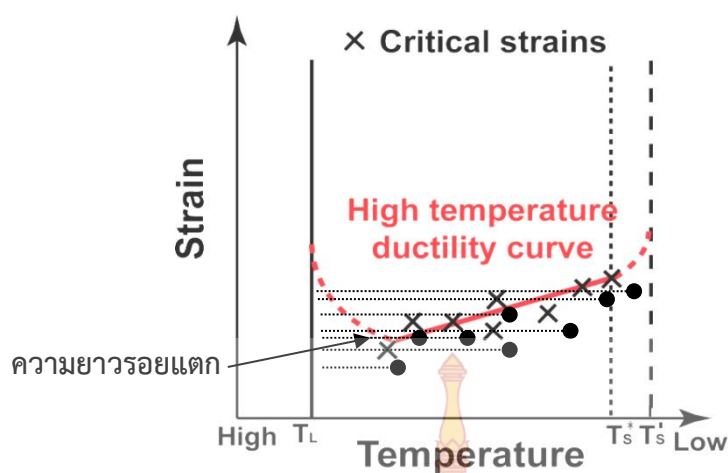
ภาพที่ 2.3 การทดสอบด้วยวิธี Trans-Varestraint test



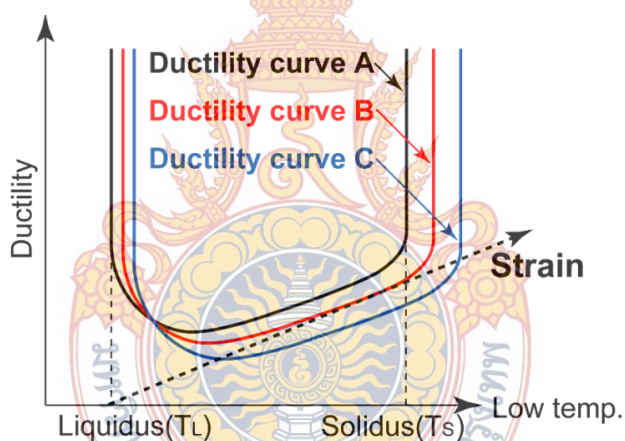
ภาพที่ 2.4 รอยแตกร้าวภายหลังทดลองด้วยเครื่อง Trans-Varestraint Test



ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยแตกกับอุณหภูมิการเย็นตัว



ภาพที่ 2.6 การสร้างเส้นโค้งความเหนียวของการแตกร้าวขณะแข็งตัว

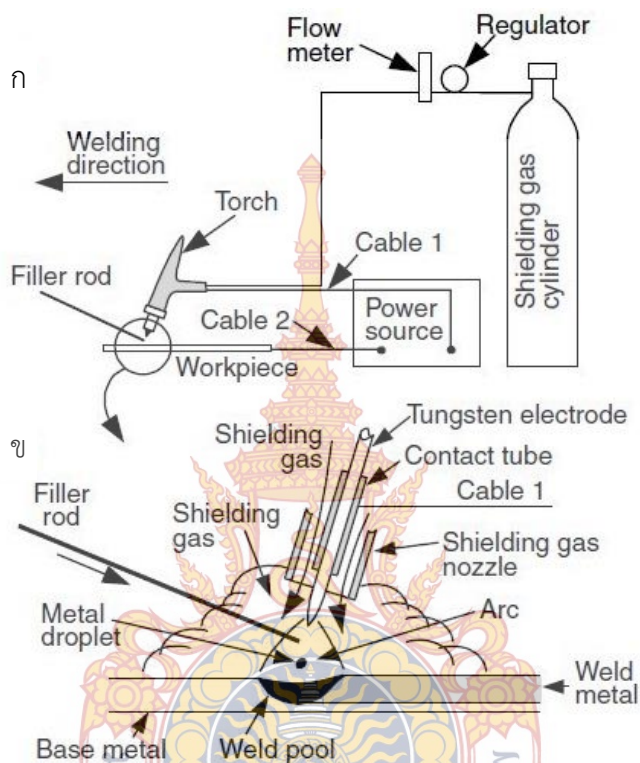


ภาพที่ 2.7 เส้นโค้งความเหนียวของการแตกร้าวขณะแข็งตัวที่วัสดุแตกต่างกัน

2.4 กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสปีคคูลัม Gas Tungsten Arc Welding: GTAW)

หลักการของกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสปีคคูลัมเป็นกระบวนการหลอม (Melt) รอยต่อโลหะ (Joint Metal) โดยให้ความร้อนกับรอยต่อโลหะด้วยการอาร์ก (Arc) ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลส (Non-consumable tungsten electrode) กับวัสดุ (Materials) (ดังแสดงในภาพที่ 2.8) หัวเชื่อม (Torch) ที่ใช้ยึดเนื้อเชื่อมทั้งสแตนเลสต่อเข้ากับท่อบรรจุแก๊สปกคลุม (Shielding gas) และมีสายไฟเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องเชื่อม (Power source) ดังภาพที่ 2.8 ก) อิเล็กโทรดทั้งสแตนเลสอยู่ในท่อทองแดงที่มีน้ำหล่อเย็น เรียกว่า "Contact tube" ดังภาพที่ 2.8 ข) ซึ่งต่อเข้ากับสายไฟเชื่อม (Cable 1) น้ำหล่อเย็นนี้ช่วยป้องกันการเกิดความร้อนที่สูงขึ้นขณะใช้กระแสไฟเชื่อม (Welding current) จากเครื่องเชื่อมที่ไหลเข้าไปในอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลสและช่วยระบายความร้อนให้กับอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลสชิ้นงาน (Work piece) ต่อเข้ากับสายอีกด้านหนึ่ง (Cable 2) ของเครื่องเชื่อม แก๊สปกคลุมไหลผ่านเข้าไปในหัวเชื่อม และออกมา

ทางรูหัวฉีด (Nozzle) แล้วพุ่งตรงไปยังบ่อหลอมละลายของแนวเชื่อม (Weld pool) เพื่อให้การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุมป้องกันได้ดีกว่ากระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding : GMAW)



ภาพที่ 2.8 การทำงานของการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุม

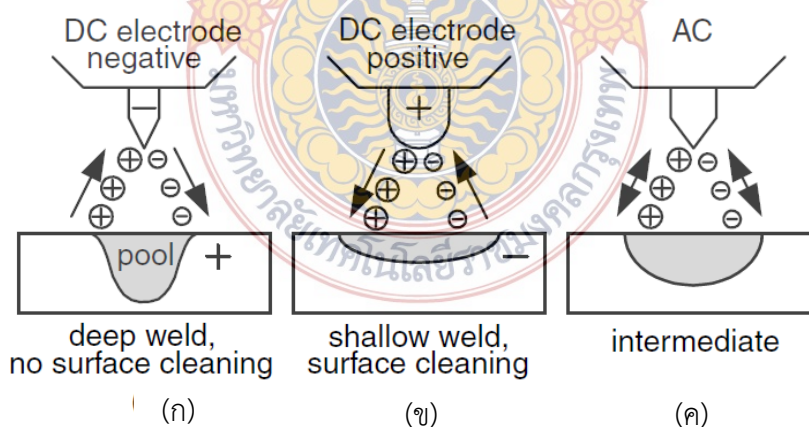
ทั้งนี้เพราะแก๊สเฉื่อย (Inert gas) เช่นแก๊สอาร์กอน (Argon) หรือฮีเลียม (Helium) มีสมบัติเป็นแก๊สปกคลุมที่ดีและแก๊สปกคลุมนี้ไหลพุ่งไปยังบ่อหลอมละลายโดยตรง ด้วยเหตุที่ใช้แก๊สเฉื่อยจึงเรียกว่า “การเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas : TIG)” ในบางครั้งก็สามารถนำแก๊สชนิดอื่น ที่ไม่ใช่แก๊สเฉื่อยในปริมาณน้อยเข้าไปผสมเป็นแก๊สปกคลุมได้ ถ้าต้องการเชื่อมโดยใช้ลวดเติม (Filler rod) เช่น ชิ้นงานที่มีความหนาที่สามารถที่จะป้อนลวดได้ทั้งแบบป้อนด้วยมือ (Manual) หรือป้อนลวดแบบอัตโนมัติ (Automatic) ได้

ก ประเภทของกระแสไฟเชื่อมและขั้วเชื่อม (Welding current and polarity)

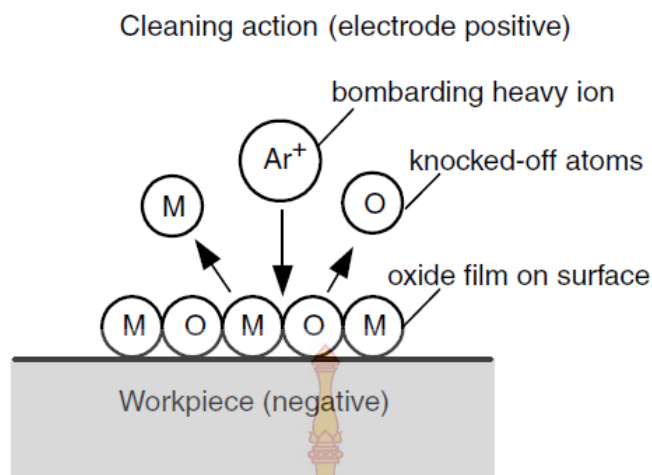
1) กระแสตรงขั้วลบ (Direct current electrode negative : DCEN) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากระแสไฟขั้วตรง (Straight polarity) เป็นขั้วกระแสไฟเชื่อมที่ใช้กันทั่วไปในกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุม ซึ่งอิเล็กโทรด (Electrode) จะต่อเข้ากับขั้วลบของเครื่องเชื่อมดังแสดงในภาพที่ 2.9 (ก) ทำให้อิเล็กตรอน (Electron) ไหลจากเนื้อเชื่อมทั้งสแตนเลสและวิ่งเข้าช่องอาร์ก ไปยังชิ้นงานที่เป็นขั้วบวกและการไหลของอิเล็กตรอนในลักษณะนี้จึงทำให้มีนัยสำคัญที่สัมพันธ์กับปริมาณของพลังงาน ซึ่ง

เรียกว่า “Work function” ก็คือ อิเล็กตรอนจะถูกบังคับให้ไหลมาจากอิเล็กโทรดและเมื่ออิเล็กตรอนวิ่งเข้าไปในชิ้นงานแล้วปริมาณของพลังงานที่เทียบเท่ากับ Work function ก็จะถูกปล่อยออกมา และด้วยเหตุนี้จึงเป็นเหตุผลว่าทำไมกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสปีคกลุ่มด้วยกระแสไฟ DCEN จึงมีความร้อนเกิดขึ้นที่ชิ้นงานในจุดที่เกิดการอาร์กมาก (ประมาณ 2/3) และเกิดความร้อนที่ปลายเนื้อเชื่อมน้อยกว่า (ประมาณ 1/3) ดังนั้นจากความสัมพันธ์ในลักษณะดังกล่าวจึงทำให้แนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมด้วยกระแส DCEN มีความลึกและแคบ กระแส DCEN เหมาะสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าสแตนเลส (Stainless steel), ทองแดงผสม (Copper alloys), นิกเกิลผสม (Nickel alloys), ทิตาเนียม (Titanium), เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel), และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel)

2) กระแสตรงขั้วบวก (Direct current electrode positive : DCEP) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กลั้วขั้ว (Reverse polarity) การต่อขั้วไฟเชื่อมแบบนี้เนื้อเชื่อมจะต่อเข้ากับขั้วบวกของเครื่องเชื่อมดังภาพที่ 2.9 (ข) ผลกระทบของความร้อนจากการไหลของอิเล็กตรอนจะอยู่ที่เนื้อเชื่อมทั้งสแตนมากกว่าชิ้นงาน ดังนั้นแนวเชื่อมที่ได้จึงตื้นและกว้างในการเชื่อมด้วยกระแส DCEP จึงต้องใช้แท่งทั้งสแตนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและใช้น้ำหล่อเย็นกับหัวเชื่อมเพื่อป้องกันแท่งทั้งสแตนหลอมจากความร้อนสูง ส่วนอ็อกไซด์ของแก๊สปกคลุมจะวิ่งเข้าชนชิ้นงานอย่างแรงดังภาพที่ 2.9 จนทำให้ชั้นบาง ๆ ของออกไซด์ (Oxide film) แยกออกจากผิวชิ้นงานจึงเป็นการทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงาน ดังนั้นการเชื่อมด้วยกระแส DCEP จึงสามารถใช้เชื่อมโลหะแผ่นบางที่มีออกไซด์เกาะบนผิวหน้าหนา ๆ ได้เช่น อลูมิเนียม (Aluminium) และแมกนีเซียม (Magnesium) ซึ่งไม่ต้องการการหลอมละลายลึกมาก



ภาพที่ 2.9 ข้อแตกต่างของกระแสไฟเชื่อมทั้ง 3 ประเภท



รูปที่ 2.10 การทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานด้วยกระแส DCEP

3) กระแสสลับ (Alternating current : AC) การเชื่อมด้วยกระแส AC นี้จะให้ผลดีทั้งการหลอมละลายลึก (Penetration) และการทำความสะอาดออกไซด์ที่เกาะอยู่บนผิวหน้าชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 2.7 (ค) ดังนั้นการเชื่อมจึงเหมาะสำหรับเชื่อมอลูมิเนียมผสม (Aluminium alloy)

ข) อิเล็กโทรด (Electrode) อิเล็กโทรดทั้งสแตนที่มี 2% เรอเรียม (2% Thorium) หรือเซอร์โคเนียม (Zirconium) จะมีการไหลของอิเล็กตรอนประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าและต้านทานต่อสิ่งสกปรกได้ดีกว่าอิเล็กโทรดทั้งสแตนบริสุทธิ์ (Pure tungsten) การเริ่มต้นอาร์กง่ายและการอาร์กคงที่

2.5 แก๊สปกคลุมที่ใช้กับการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สปกคลุม

ใช้แก๊สเฉื่อยซึ่งเป็นแก๊สที่ไม่ทำปฏิกิริยาเคมี แก๊สส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นแก๊สปกคลุมคือ อาร์กอน, ฮีเลียม, แก๊สอาร์กอนผสมฮีเลียม หรือมีแก๊สชนิดอื่นผสมเพียงเล็กน้อย

ก) แก๊สอาร์กอน (Ar) เป็นแก๊สที่ปกตินิยมใช้กันมากให้การอาร์กที่นิ่มนวล การส่งถ่ายประจุไฟฟ้าที่ดี มีการกินลึกของแนวเชื่อมที่ดี มีผิวงานที่สะอาดมากกว่าแก๊สฮีเลียม มีขอบเขตของผลความร้อนที่เกิดจากการเชื่อมที่แคบ

ข) แก๊สฮีเลียม (He)

- เป็นตัวนำความร้อนที่ดีกว่าแก๊สอาร์กอน 9 เท่า
- ให้การกินลึกที่กว้างและลึก
- ให้คุณภาพงานเชื่อมที่ดีสำหรับอะลูมิเนียม-ทองแดง การให้ความร้อนก่อนการเชื่อมยังไม่จำเป็นและสามารถเชื่อมได้อย่างรวดเร็วแต่ให้กระแสอาร์กที่ไม่ค่อยดี
- ให้แรงเคลื่อนในการเชื่อมสูงที่จำเป็น ให้กระแสอาร์กไม่คงที่
- แก๊สฮีเลียมไม่แลกเปลี่ยนตามกฎ “การแลกเปลี่ยนกับอาร์กอน การเชื่อมต้องใช้แก๊สฮีเลียม

ค) แก๊สไฮโดรเจน (H)

- เป็นตัวนำความร้อนที่ดีมากกว่าอาร์กอนถึง 11 เท่า

- โดยทั่วไปใช้เพียง 2-5 % ของอาร์กอน
- ให้การกินลึกดีกว่า
- ไม่เหมาะกับการเชื่อมอะลูมิเนียม

ทั้งนี้แก๊สปกคลุมจะใช้ได้ดีหรือเหมาะสมขึ้นอยู่กับท่าเชื่อมขนาดความโตของหัวฉีดกระแสไฟ และชนิดของแก๊สดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเลือกใช้แก๊สปกคลุมให้เหมาะสม

Gas	Chemical Symbol	Molecular Weight (g/mol)	Specific Gravity with Respect to Air at 1 atm and 0°C	Density (g/L)	Ionization Potential (eV)
Argon	Ar	39.95	1.38	1.784	15.7
Carbondioxide	CO ₂	44.01	1.53	1.978	14.4
Helium	He	4	0.1368	0.178	24.5
Hydrogen	H ₂	2.016	0.0695	0.09	13.5
Nitrogen	N ₂	28.01	0.967	1.25	14.5
Oxygen	O ₂	32	1.105	1.43	13.2

2.6 ส่วนประกอบในบริเวณรอยเชื่อม

ขอบเขตบริเวณต่าง ๆ ในรอยเชื่อมแบบหลอม Formation of The Partially Melted Zone ในรอยเชื่อมประสานเมื่อทำการวิเคราะห์ที่หน้าตัดรอยเชื่อมจะปรากฏบริเวณต่าง ๆ เช่น บริเวณหลอมละลาย (Fusion zone) มีการหลอมเหลวและแข็งตัวกลายเป็นรอยเชื่อม การเกิดบริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone; HAZ) ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเชื่อม และบริเวณโลหะขึ้นงาน (Base Material) คือ บริเวณที่ถัดออกจากบริเวณกระทบร้อนและไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจากกระบวนการเชื่อม

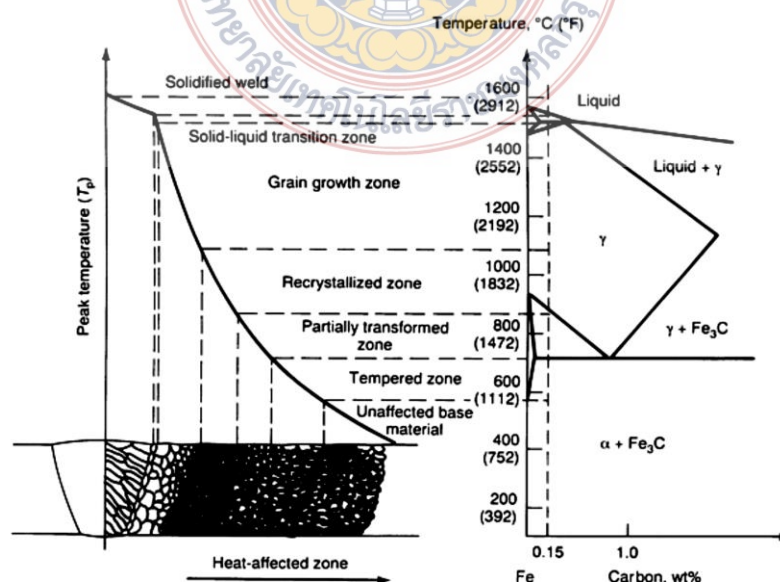
บริเวณหลอมละลาย คือ บริเวณที่เกิดจากการหลอมละลายของโลหะและแข็งตัวกลับกลายเป็นรอยเชื่อม การแข็งตัวของโลหะจะมีการสร้างโครงสร้างผลึก (Crystal structure) และขยายตัวไปเรื่อย ๆ หรือที่รู้จักกันว่า “เกรน” โดยส่วนผสมทางเคมีของโลหะจะส่งผลต่อลักษณะการแข็งตัว เช่น การเติมนิกเกิลในเหล็ก ซึ่งพบมากในสแตนเลส สามารถทำให้ลักษณะการแข็งตัวของเหล็กเปลี่ยนจากการแข็งตัวเป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) กลายเป็นแข็งตัวเป็นออสเตนไนต์ (Austenite) หรือเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจาก BCC เป็น FCC ซึ่งจะส่งผลต่อการแตกร้าวขณะร้อนของเหล็กดังกล่าวได้ บริเวณกระทบร้อนจะได้รับผลกระทบหลัก ๆ มาจากรูปแบบการได้รับความร้อนจากการเชื่อมเนื่องจากส่วนผสมทางเคมีของบริเวณ

กระแทกจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับบริเวณหลอมละลายที่ส่วนผสมทางเคมีสามารถเปลี่ยนแปลงได้จากการเติมลดหรือการเลือกใช้ก๊าซปกคลุม (Shielding) บริเวณกระแทกของชิ้นงานจะมีโครงสร้างจุลภาคแตกต่างจากทั้งบริเวณหลอมละลายและบริเวณโลหะชิ้นงาน ทั้งนี้โครงสร้างจุลภาคจะขึ้นอยู่กับประเภทและส่วนผสมของชิ้นงานเช่นกัน

ก) การแบ่งบริเวณต่าง ๆ ในรอยเชื่อม The partially melted zone (PMZ) ในอดีตการแบ่งบริเวณต่าง ๆ ในรอยเชื่อมจะแบ่งในลักษณะเดียวกันกับที่กล่าวไว้ข้างต้นคือ แบ่งเป็นบริเวณหลอมละลายและบริเวณกระแทกอย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไปและมีการวิจัยทดลองมากขึ้น ได้มีผลสังเกตการณ์ที่ละเอียดมากยิ่งขึ้นจึงทำให้การแบ่งบริเวณต่าง ๆ ในรอยเชื่อมสามารถแบ่งเป็นบริเวณย่อยๆ ได้อีกดังนี้

- 1 บริเวณหลอมละลาย (Fusion zone)
 - บริเวณผสม (Composite zone)
 - บริเวณเปลี่ยนแปลง (Transition zone)
 - บริเวณที่ไม่ผสม (Unmixed zone)
- 2) บริเวณกระแทก (Heat affected zone)
 - บริเวณหลอมบางส่วน (Partially melted zone)
 - บริเวณกระแทกจริง (True heat affected zone)
 - บริเวณกระแทกเกรนหยาบ (Coarse grain heat affected zone)
 - บริเวณกระแทกวิกฤต (Inter critical heat affected zone)
 - บริเวณกระแทกเกรนละเอียด (Fine grain heat affected zone)

บริเวณต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อม สามารถที่จะวิเคราะห์เปรียบเทียบกับแผนภาพสมดุล (Phase Diagram) ได้ในลักษณะเดียวกันกับการวิเคราะห์ทางโลหะวิทยา



ภาพที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแผนภาพสมดุลกับบริเวณต่าง ๆ ที่เกิดในรอยเชื่อม

ข) บริเวณผสม (Composite zone) เป็นบริเวณที่กินบริเวณมากที่สุดในบริเวณหลอมละลาย (Fusion zone) คือ บริเวณที่โลหะหลอมละลายและแข็งตัวอีกครั้งหนึ่งกลายเป็นรอยเชื่อม โครงสร้างจุลภาคของบริเวณผสมจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีและสภาวะการแข็งตัว (Solidification conditions) ของน้ำโลหะ ส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อมสามารถเปลี่ยนแปลงได้ผ่านการเติมเนื้อเชื่อมหรือการใช้ก๊าซปกคลุม ทั้งนี้ส่วนผสมที่เปลี่ยนไปอาจจะทำให้โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติของรอยเชื่อมเปลี่ยนไปได้ ในทำนองเดียวกันอัตราการเย็นตัวจะส่งผลต่อสภาวะการแข็งตัวของโลหะ โดยจะเห็นได้จากโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไป

บริเวณหลอมละลายของรอยเชื่อมสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ประเภท ดังต่อไปนี้

1) การเชื่อมโดยไม่เติมลวด (Autogeneous) จะพบได้จากการเชื่อมโดยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สปกคลุม (GTAW) บนชิ้นงานบาง ๆ ที่ไม่จำเป็นจะต้องทำการเติมลวดเติม หรือการเชื่อมลำอิเล็กตรอน (Electron beam welding)

2) การเชื่อมโดยใช้ลวดเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) คือ การเชื่อมด้วยการใช้ลวดเติมที่มีส่วนผสมทางเคมีเหมือนกันหรือใกล้เคียงกัน ทำให้ส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อมไม่แตกต่างจากโลหะชิ้นงาน เช่น การใช้ลวดเติม ER316L สำหรับเชื่อมสแตนเลสเกรด 316L เป็นต้น

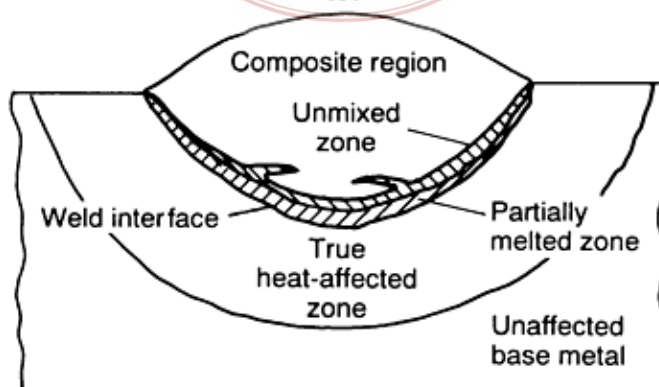
3) การเชื่อมที่ใช้ลวดที่แตกต่าง (Heterogeneous) จะเป็นการใช้ลวดเติมที่มีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างจากโลหะชิ้นงาน ทั้งนี้เพื่อเพิ่มสมบัติทางกลทางเคมี รวมทั้งความสามารถในการเชื่อมของวัสดุนั้น ๆ เช่น การใช้ลวดเติม ER4043 ในการเชื่อมอลูมิเนียมเกรด 6061 หรือการใช้ลวดเติมกลุ่ม Ni ในการเชื่อม สแตนเลส การเชื่อมโดยใช้ลวดที่แตกต่างจะได้รับความนิยมจำนวนมาก เนื่องจากโลหะชิ้นงานส่วนใหญ่มีส่วนผสมทางเคมีที่ไม่เหมาะสมกับการเชื่อม ทำให้ความสามารถในการเชื่อมต่ำ ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาการใช้เนื้อเชื่อมหรือลวดเติมที่แตกต่างจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกล ปรับปรุงความสามารถในการเชื่อม เช่น ลดโอกาสการแตกร้าวขณะร้อน รวมทั้งเพิ่มความสามารถในด้านการกัดกร่อนหรือความสามารถต้านทานการเสียดสีให้กับรอยเชื่อม เช่น การเชื่อมพอกด้วยสแตนเลส หรือการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยเนื้อเชื่อมที่แข็งกว่า อย่างไรก็ตาม การเจือจาง (Dilution) ระหว่างการหลอมของโลหะชิ้นงานและลวดเติมที่จะต้องผสมกันจำเป็นจะต้องได้รับการควบคุมอย่างระมัดระวัง เนื่องจากสัดส่วนการผสมระหว่างโลหะชิ้นงานและลวดเติมจะมีผลต่อลักษณะการแข็งตัว โครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติต่าง ๆ ของบริเวณหลอมละลายได้ เช่น ในกรณีของการเชื่อมสแตนเลส รูปแบบการแข็งตัว (Solidification mode) ของบริเวณหลอมละลายในการเชื่อม สแตนเลสอาจจะเปลี่ยนจากการแข็งตัวเป็นเฟอร์ไรต์ก่อน (FA) มาเป็นออสเตนไนต์ก่อน (FA) ซึ่งมีโอกาสในการเกิดการแตกร้าวขณะร้อนได้มากยิ่งขึ้น

4) ขอบเกรนย่อยจากการแข็งตัว (Solidification sub grain boundaries; SSGBs) คือ ขอบเกรนของเซลล์ (Cell) ที่มีต้นกำเนิดและขยายตัวออกมาในทิศทางที่ขยายตัวได้ง่าย (Easy growth direction) โดยเป็นการขยายตัวของเกรนต่อออกมาจากเกรนของชิ้นงานในบริเวณกระแทกร้อน การแข็งตัวจะเป็นไปในระดับจุลภาค (Case2) ทำให้การบิดเบี้ยวของการเรียงตัวโครงสร้างผลึก (Crystallographic misorientation) ต่ำ

5) ขอบเกรนจากการแข็งตัว (Solidification grain boundaries; SGBs) คือ ขอบเกรนที่เกิดจากการที่เกรนย่อยขยายตัวจากทิศทางที่ขยายตัวได้ง่ายจนกระทั่งมาบรรจบกันในลักษณะของการแข่งขัน (Competitive growth) มีการบิดเบี้ยวของการเรียงตัวโครงสร้างผลึกสูงเนื่องมาจากการขยายตัวของเกรนย่อยจะต่อออกมาจากเกรนของบริเวณกระหนาบร้อน ซึ่งมีการเรียงตัวกันหลายทิศทาง และเกรนย่อยที่ขยายตัวออกมาจะมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางของเกรนเดิม ทำให้เกรนย่อยมีหลายทิศทางไปด้วย เมื่อเกรนย่อยแต่ละทิศทางมีชนกันทำให้เกิดขอบเกรนจากการแข็งตัว และมีการบิดเบี้ยวของโครงสร้างผลึกสูง เรียกการแข็งตัวแบบนี้ไปในระดับมหภาค (Case3)

6) ขอบเกรนเคลื่อนย้าย (Migrate grain boundaries; MGBs) คือ ขอบเกรนที่เคลื่อนออกมาจากบริเวณที่เคยอยู่ มีการบิดเบี้ยวของการเรียงตัวโครงสร้างผลึกเช่นเดียวกับขอบเกรนจากการแข็งตัว การเคลื่อนย้ายขอบเกรนจะเกิดขึ้นเพื่อเป็นการลดพลังงานบริเวณขอบเกรน เช่น การทำให้ขอบเกรนเป็นเส้นตรงเพื่อลดระดับพลังงานที่สูงในขอบเกรนที่ไม่ตรง การเคลื่อนย้ายขอบเกรนอาจจะทำให้เกิดการกวาด (Sweeping) สิ่งเจือปน (inclusions) มารวมกันไว้ที่ขอบเกรนเคลื่อนย้าย ทำให้จุดหลอมเหลวบริเวณดังกล่าวต่ำลง ซึ่งจะเพิ่มโอกาสเกิดการแตกร้าวขึ้นได้

ค. บริเวณที่ไม่ผสม (Unmixed zone) ในภาพที่ 2.12 คือ บริเวณของเนื้อเชื่อมที่อยู่ถัดจากบริเวณขอบรอยเชื่อมเข้ามาทางกึ่งกลางของรอยเชื่อมเป็นบริเวณที่โลหะขึ้นงานหลอมละลายและแข็งตัว กลายเป็นของแข็งอีกครั้งหนึ่ง โดยที่ไม่มีการผสมกับเนื้อเชื่อมหรือลวดเติมแต่อย่างใด ในทางทฤษฎี บริเวณที่ไม่ผสมจะเกิดขึ้นอยู่ในทุก ๆ รอยเชื่อม เนื่องจากจะต้องมีโลหะขึ้นงานหลอมเหลวและเป็นฟิล์มชั้นบาง ๆ ที่บริเวณขอบรอยเชื่อมโลหะหลอมเหลวที่บริเวณกลางรอยเชื่อมจะมีความเร็วเนื่องจากตัวแปรกำหนดที่ใช้ในการเชื่อม (Welding parameters) ซึ่งความเร็วดังกล่าวจะลดลงโดยเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของรอยเชื่อมที่พิจารณา เช่น บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อม (Weld center line) จะมีอัตราการแข็งตัวเท่ากับความเร็วในการเชื่อม (Travel speed) ในขณะที่บริเวณขอบรอยเชื่อมจะมีอัตราการแข็งตัวต่ำ และความเร็วของของเหลวจะมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นชั้นฟิล์มและไม่ผสมกับเนื้อเชื่อมหรือลวดเติมดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



ภาพที่ 2.12 บริเวณที่ไม่ผสมใกล้ขอบรอยเชื่อม

ตัวแปรที่มีส่วนในการเกิดบริเวณที่ไม่ผสมสามารถแยก ได้ดังต่อไปนี้

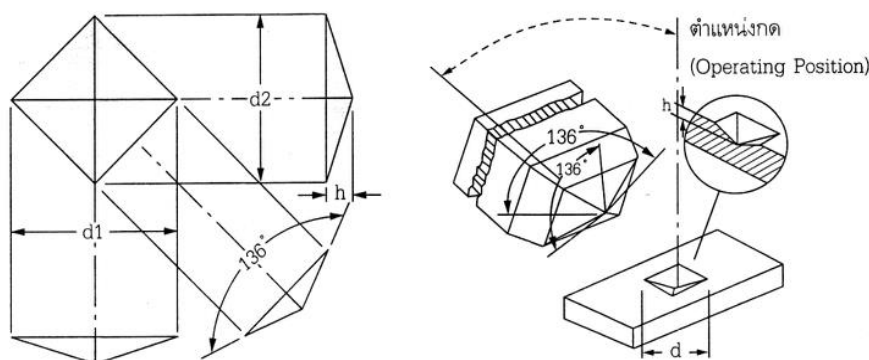
1) ส่วนผสมทางเคมีของโลหะชิ้นงานและลวดเติมรวมทั้งสมบัติทางกายภาพ มีผลต่อจุดหลอมเหลวและคุณสมบัติของของเหลว โลหะชิ้นงานที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าโลหะเชื่อมจะมีส่วนทำให้เกิดบริเวณที่ไม่ผสมได้มากกว่า อย่างไรก็ตามความหนืดของของเหลวก็มีผลเช่นกัน โลหะชิ้นงานที่หลอมเหลวและมีความหนืดมาก รวมทั้งการไม่ผสมกันระหว่างโลหะเชื่อมและโลหะงานก็มีส่วนที่จะทำให้เกิดบริเวณที่ผสมได้มากขึ้น

2) กระบวนการเชื่อมที่ใช้ความหนาแน่นของพลังงานสูง (High energy density) เช่น การเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน หรือการเชื่อมด้วยเลเซอร์ จะมีความร้อนเข้า (Heat input) ที่ต่ำกว่า มีการกระจายอุณหภูมิ (Temperature gradient) ที่ชัน รวมทั้งการโลหะหลอมเหลวมีการเคลื่อนไหวที่รุนแรง ทำให้การเกิดบริเวณที่ไม่ผสมที่น้อยกว่ากระบวนการเชื่อมอาร์ก เช่น การเชื่อมอาร์กทังสเตนแคโทด (GTAW) การเชื่อมมิกแมกซ์ (GMAW)

3) เงื่อนไขในการเชื่อมการกระจายอุณหภูมิส่งผลต่อความกว้างของบริเวณที่ไม่ผสม เนื่องจากเป็นตัวกำหนดบริเวณหรือความกว้างของโลหะชิ้นงานที่จะถูกหลอมเหลวโดยความร้อนจากการเชื่อม นอกจากนี้การไหลของโลหะหลอมเหลวผลกระทบด้วยเช่นกัน หากของโลหะหลอมเหลวไหลด้วยความรุนแรง บริเวณที่โลหะชิ้นงานหลอมก็จะผสมกับโลหะเชื่อมได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น ช่วยป้องกันการเกิดบริเวณที่ไม่ผสม

2.7 การทดสอบสมบัติทางกล

2.7.1 การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro vickers hardness testing) และใน www.gordengland.co.uk (2006) [20] กล่าวว่า เป็นการใช้หัวกดเพชรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมที่มีมุมปลายแหลม 136° กดลงบนผิววัสดุชิ้นทดสอบด้วยแรงกดคงที่ขนาด 1 กรัมแรง (gf) ถึง 2 กรัมแรง (kgf) หรือ 1 ถึง 2000 กรัมแรง จากนั้นวัดขนาดรอยกดด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายระหว่าง 100X ถึง 500X ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุดในงานเชื่อม โดยความลึกของรอยกดประมาณ $1/7$ ของความยาวเส้นทแยงมุมดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ลักษณะหัวกดเพชรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมที่มีมุมปลายแหลม 136° และลักษณะรอยกดที่ได้จากการทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์

การคำนวณหาความแข็งจุลภาคแบบไมโครวิกเกอร์การคำนวณหาความแข็งจุลภาคแบบไมโครวิกเกอร์ จะใช้สูตรในการคำนวณเช่นเดียวกับค่าความแข็งวิกเกอร์

$$\text{ความแข็งจุลภาค (Micro hardness: MH)} = \frac{\text{แรงกดที่ใช้ทดสอบ (F)}}{\text{พื้นที่รอยกดที่ผิวทดสอบ (A)}}$$

$$\text{พื้นที่รอยกดหรือพื้นที่ผิวเอียงของรอยบุ๋ม (A)} = \text{พื้นที่สามเหลี่ยม 2 รูป}$$

$$= 2 \times \left(\frac{1}{2} \times d \times \frac{d}{2} \right)$$

$$= \frac{d^2}{2}$$

$$\text{แรงกด (F)} = 2 \times F \times \sin \frac{136^\circ}{2}$$

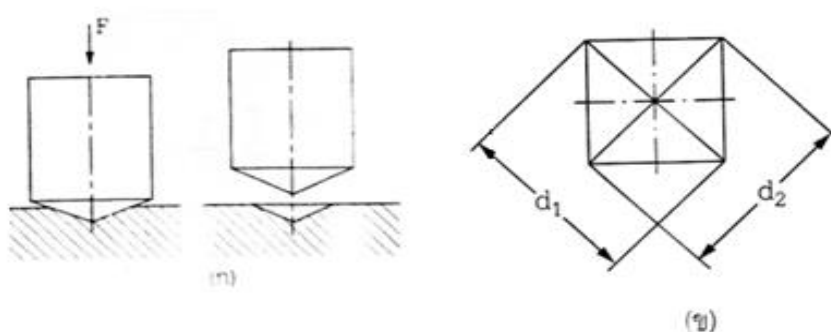
$$\text{ความแข็งจุลภาควิกเกอร์ (MHV)} = \frac{\text{แรงกดที่ใช้ทดสอบ (F)}}{\text{พื้นที่รอยกดที่ผิวทดสอบ (A)}}$$

$$\text{แทนค่า} = \frac{2 \times F \times \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2}$$

$$= \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

F = แรงกดที่ใช้ทดสอบ (มีหน่วยเป็น กิโลกรัมแรง (kgf), นิวตัน (N), ปอนด์แรง (lbf))

d = ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมทั้งสอง d1 และ d2 = $\frac{d1 + d2}{2}$ (มีหน่วยเป็น μm , mm, cm หรือนิ้ว)



ภาพที่ 2.14 การหาค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมพื้นที่รอยกดเฉียง 136°

2.8 ทฤษฎีการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

2.8.1 หลักการขึ้นเรือนชิ้นงานแบบร้อน (Hot mounting) โดยการใช้เทอร์โมเซตติงเรซินหรือเทอร์โมพลาสติกเรซินชนิดผงอัดและหลอมด้วยความร้อนแล้วปล่อยให้แข็งตัวรอบชิ้นงาน เรซินที่ใช้ในกลุ่มนี้ ได้แก่ เบเคไลต์ (Bekelite) หรือ เรซินฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ และเรซินไดอัลลิฟาทาเลต

โดยวิธีการขึ้นเรือนแบบร้อนนี้ใช้เครื่องอัดที่มีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ แม่พิมพ์โลหะ (Metal mold) รูปทรงกระบอกมีระบบแรงดันใช้ลมหรือน้ำมัน ระบบหล่อเย็น ระบบการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์โลหะซึ่งช่วยลดความต้านทานสามารถตั้งอุณหภูมิได้ ดังภาพที่ 2.15 แสดงส่วนประกอบแม่พิมพ์ขึ้นเรือนชิ้นงานแบบร้อน

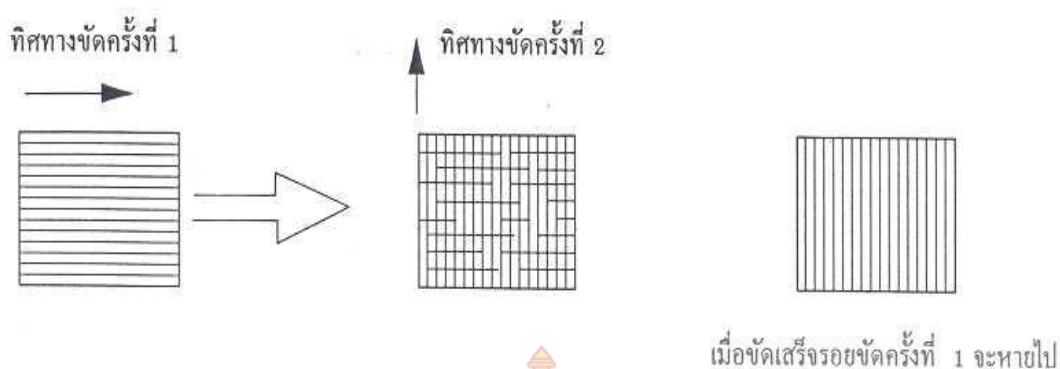
ในขั้นตอนการปฏิบัติขึ้นเรือนชิ้นงานแบบร้อน เริ่มต้นจากชิ้นงานให้มีขนาดเล็กกว่าแม่พิมพ์โลหะ รูปทรงกระบอกตามที่ผู้ตรวจสอบต้องการ จากนั้นนำชิ้นงานมาวางตรงกึ่งกลางฐานดันชิ้นงานออก แล้วนำผงเบเคไลต์ มาใส่ลงในแม่พิมพ์ตามความเหมาะสมของผู้ตรวจสอบ จากนั้นปิดฝาแม่พิมพ์โลหะ แล้วทำการปรับตั้งเวลาอัตโนมัติในการให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิสูงจนถึงผงเบเคไลต์หลอมละลายหลังจากนั้นเครื่องอัดขึ้นรูปชิ้นงาน จากนั้นระบบน้ำหล่อเย็นจะเริ่มทำงานจนอุณหภูมิเย็นตัวลง จากนั้นเปิดฝาเครื่องอัดจะได้ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแบบร้อนแสดงดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 เครื่องอัดชิ้นงานขึ้นรูปแบบร้อน

2.8.2 การขัดหยาบชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา

ขั้นตอนการขัดผิวชิ้นตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา เริ่มต้นขัดด้วยกระดาษทรายหยาบที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 240 300 400 600 800 1,000 จากนั้นขัดด้วยกระดาษทรายละเอียดเบอร์ 1,200 ตามลำดับ ในขั้นตอนการขัดจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระล้างเศษสิ่งสกปรกขณะทำการขัดชิ้นงาน เช่น ผงโลหะและซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไป ควรขัดชิ้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย แสดงดังในภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 การขัดกระดาดหลาย

2.8.3 การขัดมันชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา เป็นขั้นตอนสุดท้ายเพื่อขจัดรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการขัดผิวด้วยกระดาษทรายให้เรียบมันวาว ผ้าขัดที่ใช้ส่วนใหญ่ ได้แก่ ผ้าใบ ผ้าสักหลาด ผ้าไนลอน และหนังซามัวร์ เป็นต้น

ผงขัดที่ใช้ในการขัดมัน เป็นผงขัดที่มีความละเอียดสูง ได้แก่ ผงขัดออกไซด์ (Oxide polishing) เช่น อลูมิเนียมออกไซด์หรืออะลูมินา และผงขัดเพชร (Diamond polishing : DP) ขนาดตั้งแต่ 9-0.1 μm

2.8.4 การกัดด้วยน้ำยา (Etching) ชิ้นตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้นจะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นจะถูกนำไปกัดด้วยน้ำยา ซึ่งจะเป็นน้ำยาอะไรนั้นต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการตรวจสอบ เช่น ถ้าเป็นเหล็กจะใช้กรดไนตริก ร้อยละ 2-4 ผสมแอลกอฮอล์ตัวอย่างของน้ำยากัดผิวตรวจสอบของโลหะบางชนิด น้ำยาเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะชนิดต่างๆ แยกออกเป็น 2 ประเภทคือ น้ำยาที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของเหล็ก และน้ำยาที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ดังตารางที่ 2.2 นี้ จะประกอบด้วยรายละเอียดของชื่อ น้ำยาชนิดต่างๆ ตลอดจนส่วนผสมของน้ำยาเหล่านั้น นอกจากนี้ยังได้บอกเวลาในการกัดด้วยน้ำยาเหล่านั้นอีกด้วย

วิธีการกัดขึ้นรอยด้วยสารละลาย กระทำได้หลายวิธีด้วยกัน คือ

- 1) วิธีการจุ่ม เป็นการนำเอาชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการขัดผิวมันและทำความสะอาดดีแล้วกัดขึ้นรอยด้วยสารละลายโดยการจุ่มผิวหน้าที่ต้องการตรวจสอบ
- 2) วิธีการหยด เป็นการกัดขึ้นรอยด้วยสารละลายโดยการหยดน้ำยาเคมีลงบนผิวหน้าชิ้นงาน โดยหงายผิวชิ้นงานด้านที่ต้องการตรวจสอบแล้วหยดน้ำยาเคมีลงบนผิวชิ้นงาน
- 3) วิธีการจุ่มในน้ำยาเคมี 2 ชนิด เป็นการกัดขึ้นรอยด้วยสารละลายโดยการกัดนำ (Pre-etching) ก่อนโดยใช้น้ำยาเคมีชนิดหนึ่ง แล้วจึงกัดอีกครั้งหนึ่งด้วยน้ำยาเคมีชนิดหนึ่ง
- 4) วิธีการทา เป็นการกัดขึ้นรอยด้วยสารละลายโดยการใช้ผ้าสำลี หรือแปรงขนสัตว์จุ่มน้ำยาเคมีทาบนผิวหน้างานให้ทั่ว

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นตรวจสอบที่เป็นเหล็ก

น้ำยากัดผิวตรวจสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
กรดไนตริกและไฮโดรคลอริก (Nitric acid and hydrochloric)	กรดไนตริก (HNO_3) 3 มิลลิลิตร, ไฮโดรคลอริก (HCl) 10 มิลลิลิตรและเมทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร	เหล็กเครื่องมือ เหล็กกล้าคาร์บอน	จุ่มชิ้นตรวจสอบ นาน 10-30 วินาที

2.8.5 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์เป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจสอบดูโครงสร้างภายในเนื้อโลหะ อาจเป็นการตรวจสอบดูโครงสร้างมหภาค หรือ โครงสร้างจุลภาค กล้องจุลทรรศน์ สำหรับดูโครงสร้างภายในเนื้อโลหะที่ใช้กันมากมี 2 ชนิด คือ กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopes) และกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน (Electron microscopes)

1) หลักการของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง คือใช้หลักการให้แสงจากแหล่งกำเนิด (Light source) ผ่านไปตามท่ออิลลูมินเนชัน (Illumination tube) ไปกระทบกับแผ่นกระจกสะท้อนแสง (Plane glass reflector) ให้แสงหักเหไปยังเลนส์วัตถุ แสงจะตกกระทบกับผิวหน้าชิ้นงานทดสอบแล้วสะท้อนกลับไปที่เลนส์วัตถุ (Objective lens) ผ่านแผ่นกระจกสะท้อนส่งไปยังเลนส์ตา (eyepiece lens) และแสงไปกระทบนัยสตา ทำให้สามารถมองเห็นภาพโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์แสดงดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานทดลองงานวิจัย

การศึกษาความสามารถในการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 โดยมีขั้นตอนแนวคิดของการดำเนินการวิจัยครั้งนี้แสดงดังภาพที่ 3.1

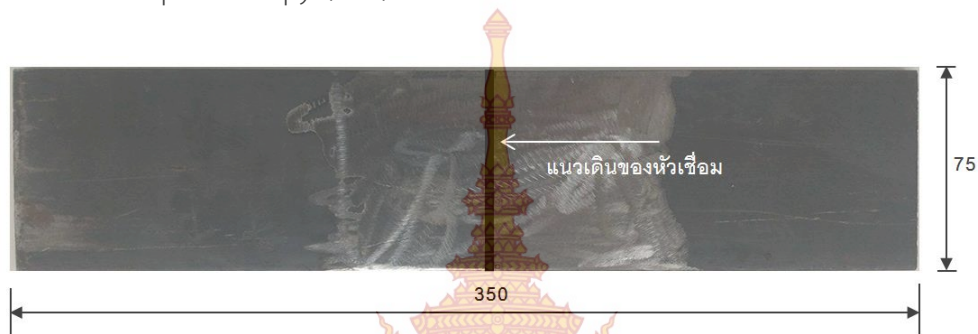


ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนแนวคิดของโครงการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 โดยชิ้นงานมีขนาดความกว้าง 75 mm ความยาว 350 mm และความหนา 6 mm ดังภาพที่ 3.1 จากนั้นนำชิ้นงานมาขัดทำความสะอาดเพื่อเตรียมไว้ทำการทดลองและขัดทำความสะอาดชิ้นงานเชื่อมด้วยอะซิโตน ขณะที่ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุชิ้นงานทดลองเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ได้จากการตรวจสอบด้วยวิธี Optical Emission Spectroscopy (OES) ดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานที่จะทำการทดสอบด้วย Trans-Varestraint Test

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni	Co	V
SKD11	1.412	0.375	0.365	0.026	0.014	0.601	11.029	0.127.	0.029	0.321

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

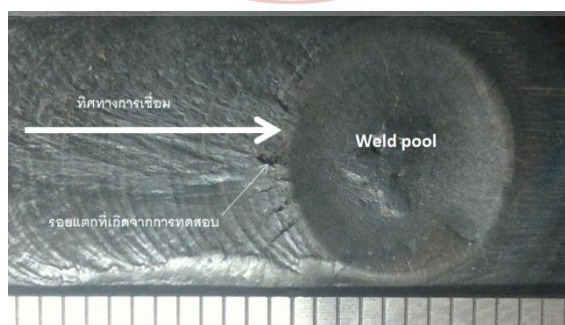
3.2.1 ทดลองหาความไวในการแตกร้าขณะแข็งตัวด้วย Transverse-Varestraint Test เพื่อประเมินหาความยาวสูงสุดของรอยแตกร้าขณะแข็งตัวสำหรับบ่อหลอมรอยเชื่อมของเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 ดังภาพที่ 3.3 ซึ่งจะได้รอยแตกร้าขณะแข็งตัวดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.3 การทดสอบด้วย Trans-Varestraint Test



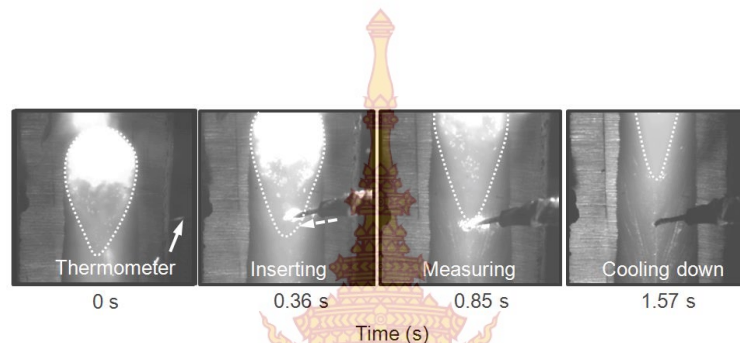
ภาพที่ 3.4 รอยแตกร้าวขณะแข็งตัวภายหลัง Trans-Varestraint Test



ภาพที่ 3.5 การพิจารณาในการวัดขนาดความยาวรอยแตกร้าวขณะแข็งตัวของรอยเชื่อม

ภาพที่ 3.5 จะแสดงบริเวณในการพิจารณาของการวัดขนาดความยาวรอยแตกช้าขณะแข็งตัวของรอยเชื่อมโดยจะพิจารณารอยแตกที่อยู่ในทิศทางของการเชื่อมเท่านั้นกล่าวคือ การแตกจะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่ออัตราความเครียดเกินกว่าความต้านทานวัสดุในการแตกช้า (เส้นโค้งความเหนียว) ในช่วงอุณหภูมิแข็งเปราะ (Brittle Temperature Range, BTR) หากมีการแตกช้าที่จุดอื่นจะไม่ถือว่าเป็นการแตกช้าขณะแข็งตัว

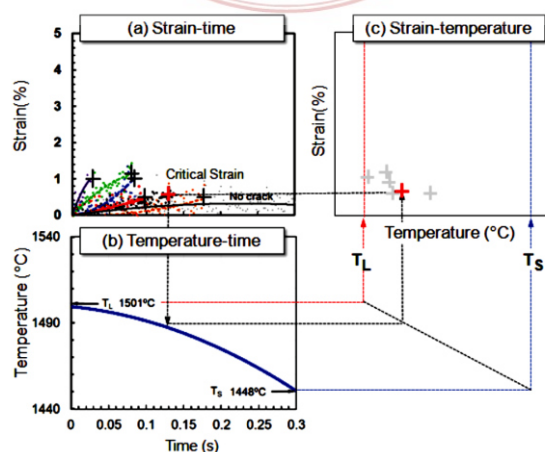
3.2.2 การตรวจวัดประเมินอัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมแนวเชื่อมขณะแข็งตัวด้วยเทอร์โมคัปเปิลเพื่อสร้างเส้นโค้งความเหนียวในการแตกช้าขณะแข็งตัวของเหล็กกล้า SKD11 โดยมีขั้นตอนดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 วิธีการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลในบ่อหลอม [11]

ภาพที่ 3.6 วิธีการใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอัตราการเย็นตัวของบ่อหลอม ด้วยวิธีการเชื่อมทิกจนเกิดจุดหลอมเหลวแล้วจึงนำสายวัดเทอร์โมคัปเปิลจุ่มวัดอุณหภูมิที่บ่อหลอม แต่หัวเชื่อมยังเดินทำการเชื่อมอยู่ในขณะเดียวกันตรงจุดที่หัวเชื่อมที่ผ่านบ่อหลอมไปแล้วจะค่อย ๆ เย็นตัวลงและเครื่องเทอร์โมคัปเปิลจะแสดงค่าอัตราการเย็นตัวของวัสดุและใช้ Data Logger เป็นตัวเก็บข้อมูล

ในการสร้างเส้นโค้งความเหนียวในการแตกช้าขณะแข็งตัวของเหล็กแต่ละชนิด โดยการสร้างเส้นโค้งความเหนียวจะมีขั้นตอนดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 การสร้างเส้นโค้งความเหนียวในการแตกช้าขณะแข็งตัวของวัสดุ

ภาพที่ 3.7 ในการสร้างเส้นโค้งความเหนียว เมื่อได้ความยาวรอยแตกและค่าความเร็วในการเดินหัวเชื่อม (V_w), ความยาวรอยแตกสูงสุด (MCD) , เปอร์เซนต์ความเครียด (% ϵ), ค่าอัตราการเย็นตัวของบ่อหลอม (ΔT), ค่าความเปลี่ยนแปลงของเวลา (Δt) จึงได้สมการในการคำนวณหาอุณหภูมิปลายรอยแตกเพื่อสร้างเส้นโค้งความเหนียวในการแตกร้า ดังต่อไปนี้

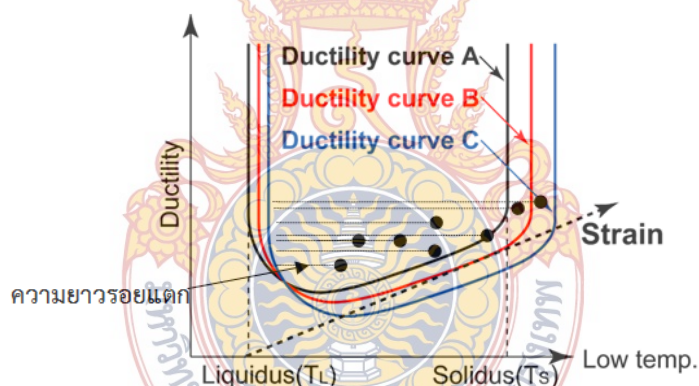
$$\text{อัตราการเย็นตัว (CR)} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad \text{สมการ.....(3.1)}$$

$$\text{เวลาที่เคลื่อนที่ถึงปลายรอยแตก (t)} = \frac{MCD}{V_w} \quad \text{สมการ.....(3.2)}$$

$$\text{ช่วงอุณหภูมิที่แตกร้า} = t \times CR \quad \text{สมการ.....(3.3)}$$

$$\text{อุณหภูมิปลายรอยแตกร้า (MTC)} = T_L - \text{ช่วงอุณหภูมิที่แตกร้า} \quad \text{สมการ.....(3.4)}$$

3.2.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบความไวในการแตกร้าขณะแข็งตัวเชิงปริมาณของเหล็กกล้า SS400, S50C และ SKD11 ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 เส้นโค้งความเหนียวของการแตกร้าขณะแข็งตัวที่วัสดุเหล็กแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน [1]

3.2.4 เครื่องเชื่อมที่ใช้สำหรับการทดลองนี้จะเป็นเครื่องเชื่อม GTAW เป็นเครื่องเชื่อมที่สามารถใช้ไฟฟ้าระบบ AC / DC ระบบควบคุมโดยปั้มกดที่หน้าเครื่องขับเคลื่อนหัวเชื่อมอัตโนมัติตามแนวเชื่อมลักษณะรอยเชื่อมแบบไม่เต็มลวด ดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 เครื่องเชื่อม GTAW ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.5 ชุดอุปกรณ์แก๊สที่ใช้ปกคลุมแนวเชื่อมและบ่อหลอมละลายเพื่อไม่ให้อากาศโดยรอบเข้าไปทำปฏิกิริยาในขณะเชื่อมซึ่งเป็นแก๊สผสมที่มีอัตราส่วนผสมดังนี้ คือ 80% Ar+20% CO₂ ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม

ดังในตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขตัวแปรการทดลองเชื่อม โดยใช้กระแสไฟเชื่อมที่ 150 A มีขนาดของแท่งทั้งสะเทิน 2.4 mm ใช้แก๊สอาร์กอนปกคลุม ซึ่งมีอัตราการไหลอยู่ที่ 10 L/min มีความยาว

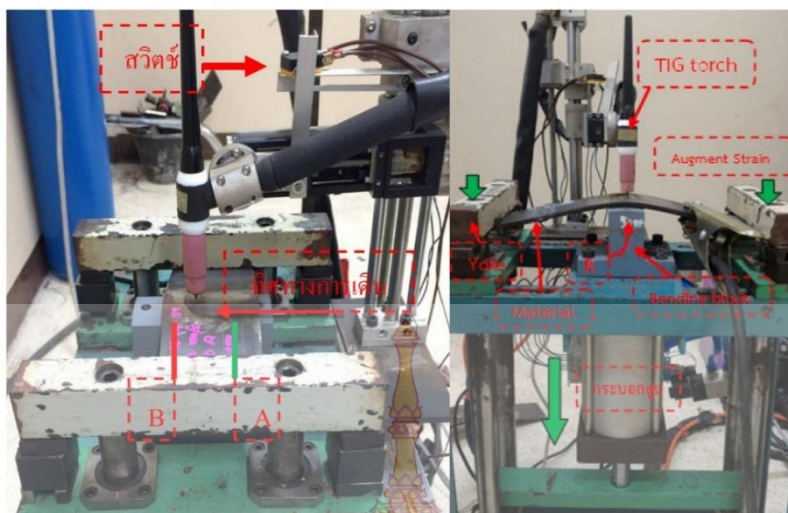
ของแนวเชื่อมทดสอบอยู่ที่ 37.5 mm และทดสอบการดัดโค้งในขณะที่เชื่อมมีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเดิมเชื่อม ระยะเวลาในการทดสอบการดัดโค้ง 1-3 s จะกระทำในขณะที่เชื่อมเกือบถึงจุดสิ้นสุดการเชื่อม ด้วยแรงกดดัดโค้ง 99 Bar โดยมีรัศมีการดัดโค้งตั้งแต่ รัศมี 70 – 400 mm ดังในตารางที่ 3.3 และภาพที่ 3.11 หลักการทำงานของชุดทดสอบ Trans-Varestraint Test จากนั้นทำการวัดจำนวนรอยแตกร้าวและสร้างเส้นโค้งความเหนียว

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขตัวแปรการเชื่อม

Current	150 amps, DCEN
Electrode	W-2ThO ₂ , 2.4 mm diameter
Shielding	99.9% argon
Shielding Gas Flow Rate	10 L/min
Weld Length	37.5mm
Bend Orientation	Transverse
Bend Hold Time	1-3 s after arc shut off
Pressure	9 Bar

ตารางที่ 3.3 ขนาดแผ่นรองของรัศมี Bending Block

รัศมี Bending Block (A)	ขนาดแผ่นรอง (B)
R70mm	36mm
R125mm	41mm
R200mm	46mm
R300mm	51mm
R400mm	54mm



ภาพที่ 3.11 หลักการทำงานของชุดทดสอบ Trans-Varestraint Test

3.3 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

ก่อนทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ได้นำเหล็กกล้าที่จะทำการตรวจสอบมาทำการขึ้นเรือน คือ การฝังชิ้นงานลงในเรซินโดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ชิ้นงานมีผิวหน้าที่เป็นระนาบและมีขนาดพอเหมาะกับการจับยึดได้สะดวกในการขัดผิวในขั้นตอนต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 3.12



(ก) เครื่องขึ้นเรือนชิ้นงาน (Mounting)

(ข) ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นเรือน

ภาพที่ 3.12 ขั้นตอนการขึ้นเรือนชิ้นงานตรวจสอบ



ภาพที่ 3.13 ขั้นตอนการขัดกระดาษทรายเบอร์ 240-1,200

ภาพที่ 3.13 แสดงการขัดเหล็กเพื่อกำจัดรอยขีดข่วนหรือร่องรอยที่เกิดจากการตัด ขั้นตอนของการขัดผิวจะขึ้นอยู่กับเพิ่มความละเอียดของกระดาษทราย มีทั้งการขัดผิวแบบหยาบ การขัดผิวแบบละเอียดตามลำดับ และใช้การขัดผิวแบบเปียก (Wet Grinding) จะใช้น้ำเป็นทั้งสารหล่อเย็นและสารหล่อลื่น

หลังจากที่ขัดผิวชิ้นงานแบบละเอียด เพื่อทำการกำจัดร่องรอยจากการขัดแบบหยาบขั้นตอนสุดท้ายให้หมดไปหรือเหลือน้อยที่สุด ทำให้ผิวหน้าชิ้นงานมีลักษณะเรียบเป็นมันวาว เพื่อให้ชิ้นงานทำการกัดขึ้นรอยในขั้นตอนต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 3.14 โดยมีส่วนผสมของสารเคมีที่ใช้ในการกัดกรดดังตารางที่ 3.4 จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำดังภาพที่ 3.15



(ก) สารเคมีในการกัดกรด



(ข) การใช้เข็มจิ้มชิ้นงานจุ่มสารเคมี

ภาพที่ 3.14 ขั้นตอนการกัดกรดผิวหน้าชิ้นทดสอบ

ตารางที่ 3.4 สูตรกัณฑ์กรดของเหล็กSKD11

ประเภทเหล็ก	กรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)	แอลกอฮอล์ (มิลลิลิตร)	เวลาจุ่ม (วินาที)
SKD11	4	100	4



(ก) กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ

(ข) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ภาพที่ 3.15 การใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

3.4 ขั้นตอนการทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งใช้วิธีการทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์จุดประสงค์เพื่อดูค่าความแข็งที่เปลี่ยนแปลงบริเวณรอยเชื่อมแต่ละบริเวณที่ได้รับความร้อนต่างกัน ในการทดสอบใช้โหลดกดทดสอบ 300 gf เวลาในการกดแช่ 10 S ที่ตำแหน่งโลหะเชื่อม บริเวณกระแทกร้อน และบริเวณเนื้อเชื่อม โดยมีอุปกรณ์ในการทดสอบดังภาพที่ 3.16 (ก) และ (ข)



(ก) เครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบไมโครวิกเกอร์



(ข) ตำแหน่งทดสอบ

ภาพที่ 3.16 ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแรงแบบไมโครวิกเกอร์

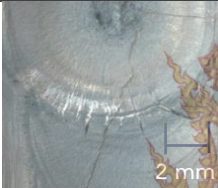
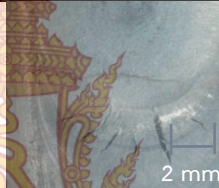
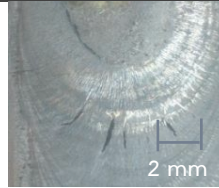
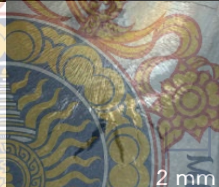
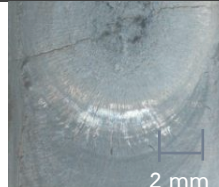
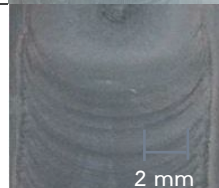
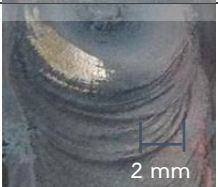
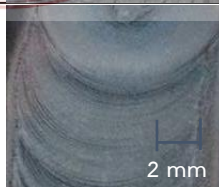
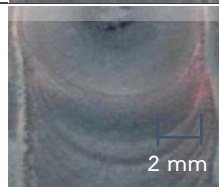
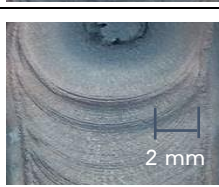
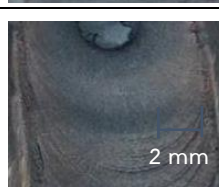


บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

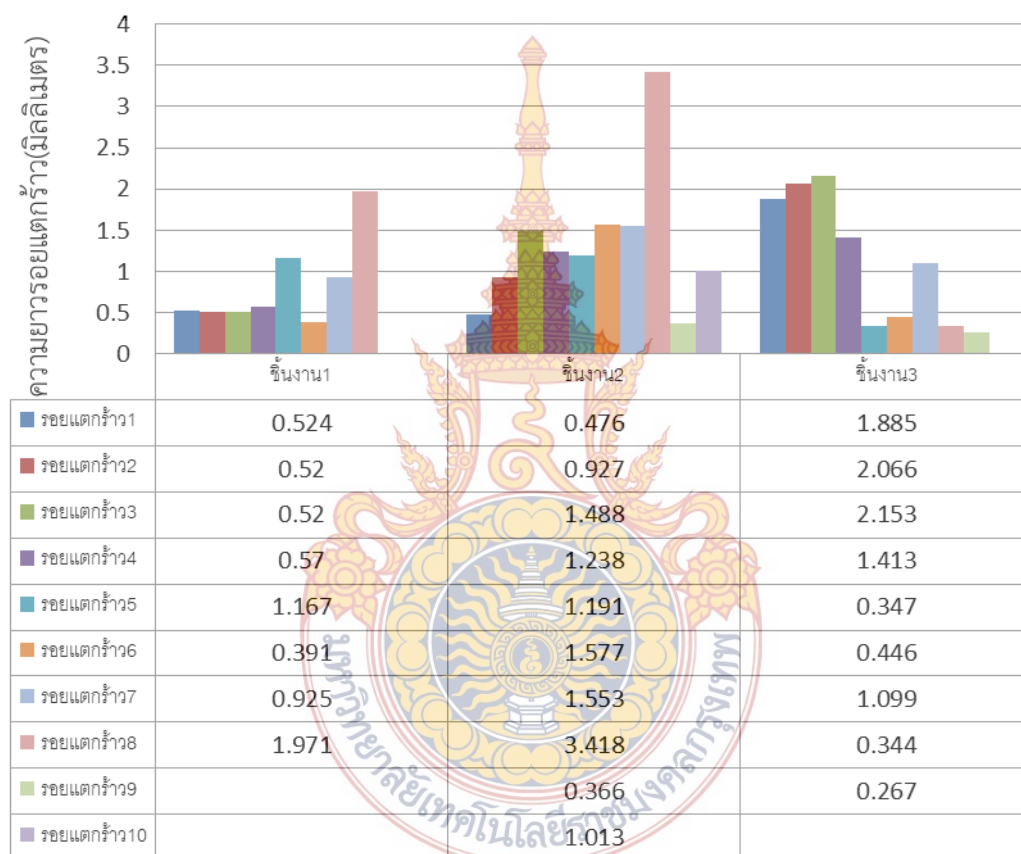
ในบทที่ 4 แสดงผลการวิจัยและอภิปรายผลการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 เกี่ยวกับความเครียดที่ก่อให้เกิดความไวในการแตกร้าว และการตรวจวัดประเมินอัตราการเย็นตัวของบ่อหลอม รวมทั้งการตรวจสอบวิเคราะห์ทางโครงสร้างจุลภาคและการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมเพื่อเป็นข้อในการเลือกใช้รูปร่างขนาดของการบากเจาะร่องในการเชื่อมซ่อมแซมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 เพื่อลดอัตราการร้าวที่จะเกิดการแตกร้าวขณะเชื่อมซ่อมได้ ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบรอยการแตกร้าว

รัศมี Bending block	ชิ้นงานที่1	ชิ้นงานที่2	ชิ้นงานที่3
R70 mm			
R125 mm			
R200 mm			
R300 mm			
R400 mm			

ภาพที่ 4.1 รอยแตกร้าวขณะแข็งตัวของเหล็กกล้า SKD11

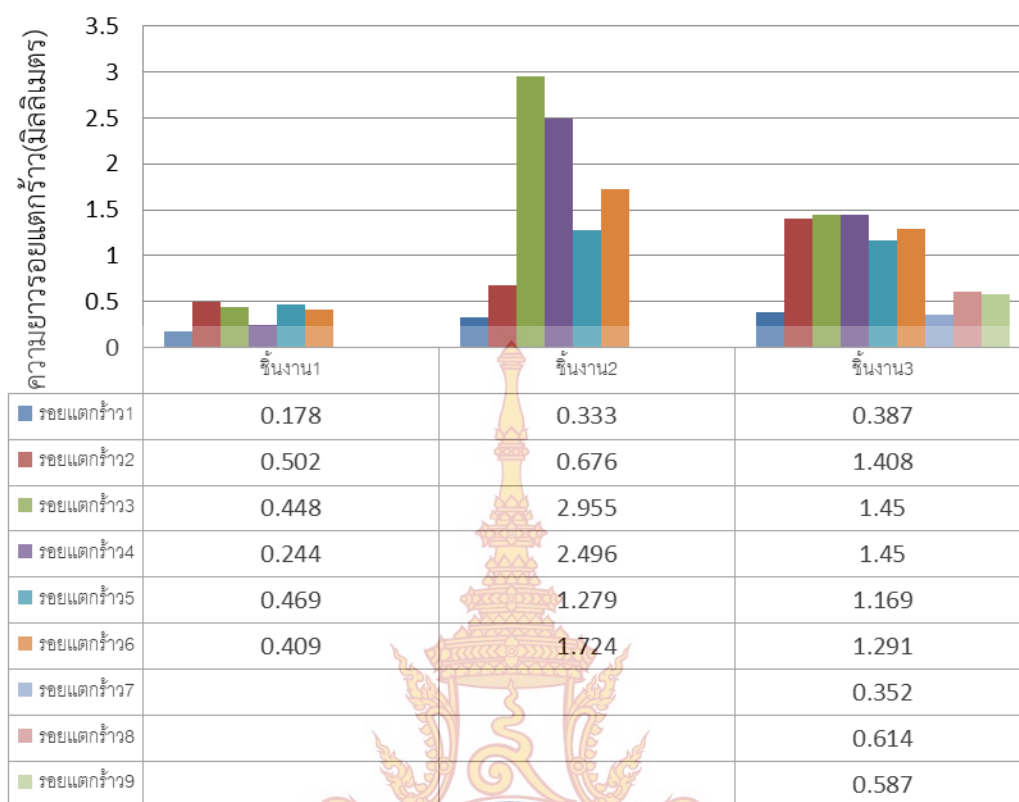
จากภาพที่ 4.1 ได้มีการวัดขนาดความยาวรอยแตกร้าวขณะแข็งตัวของเหล็กกล้า SKD11 เพื่อทำการประเมินความยาวรอยแตกร้าวขณะแข็งตัวของเหล็กกล้า ซึ่งเหล็กกล้า SKD11 มีรอยแตกร้าวขณะแข็งตัว 2 Bending Block เท่านั้น ได้แก่ Bending Block R70 และ Bending Block R125 ส่วน Bending Block R200, R300 และ Bending Block R400 ไม่มีความยาวรอยแตกร้าวขณะแข็งตัวโดยขนาดความยาวรอยแตกที่ได้จะแสดงข้อมูลในกราฟในภาพที่ 4.2 ถึงภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.2 จำนวนและความยาวรอยแตกร้าวขณะแข็งตัวของเหล็กกล้า SKD11 ที่ Bending Block R70

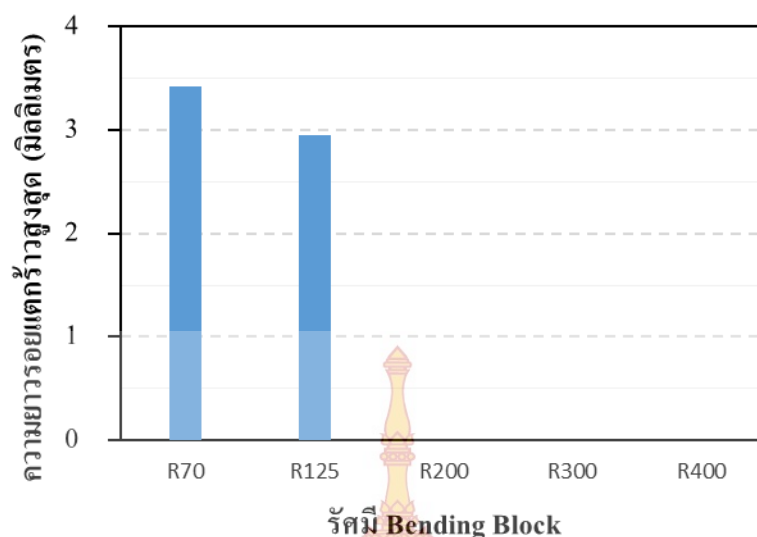
ภาพที่ 4.2 แสดงข้อมูลจำนวนรอยแตกร้าวขณะแข็งตัวของเหล็กกล้า SKD11 ที่ Bending Block R70 มีชั้นงานทดสอบ 3 ชั้นงาน ซึ่งชั้นงานที่ 1 จำนวนรอยแตก 8 ตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งที่ 8 มีความยาวรอยแตกสูงสุด คือ 1.971 มิลลิเมตร ชั้นงานที่ 2 จำนวนรอยแตก 10 ตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งที่ 8 มีความยาวรอยแตกสูงสุด คือ 3.418 มิลลิเมตร และชั้นงานที่ 3 จำนวนรอยแตก 9 ตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งที่ 3 มีความยาวรอยแตกสูงสุด คือ 2.153 มิลลิเมตร

ดังนั้นรอยแตกของเหล็กกล้า SKD11 ที่ Bending Block R70 ชั้นงานที่ 2 มีความยาวรอยแตกสูงสุด คือ 3.418 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยความยาวรอยแตกสูงสุดทั้ง 3 ชั้นงาน คือ 2.514 มิลลิเมตร



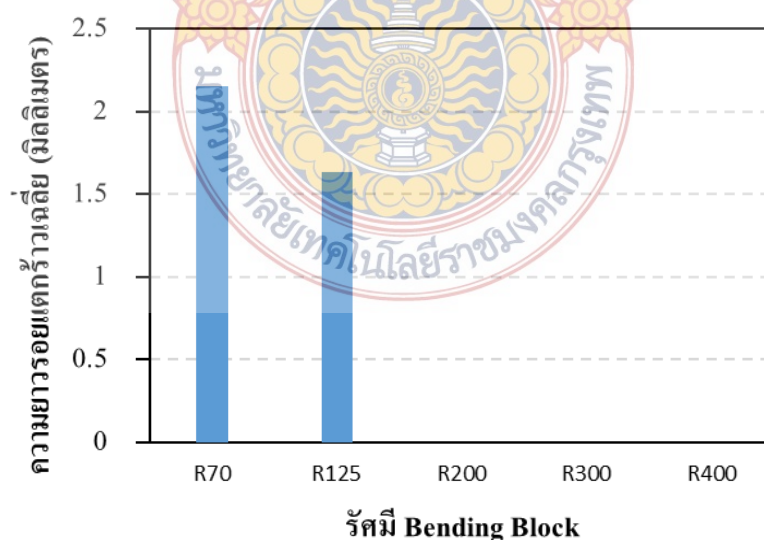
ภาพที่ 4.3 จำนวนและความยาวรอยแตกของเหล็กกล้า SKD11 ที่ Bending Block R125

จากภาพที่ 4.3 แสดงข้อมูลจำนวนรอยแตกของเหล็กกล้า SKD11 ที่ Bending Block R125 มีจำนวนรอยแตก 3 ระยะการทดสอบ โดยระยะการทดสอบที่ 1 จำนวนรอยแตก 6 ตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งที่ 2 มีความยาวรอยแตกสูงสุด คือ 0.50 มิลลิเมตร ระยะการทดสอบที่ 2 จำนวนรอยแตก 6 ตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งที่ 3 มีความยาวรอยแตกสูงสุด คือ 2.96 มิลลิเมตรและระยะการทดสอบที่ 3 จำนวนรอยแตก 9 ตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งที่ 3 และ 4 มีความยาวรอยแตกสูงสุด คือ 1.45 มิลลิเมตร ดังนั้นรอยแตกของเหล็กกล้า SKD11 ที่ Bending Block R125 ระยะการทดสอบที่ 2 มีความยาวรอยแตกสูงสุด คือ 2.96 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยความยาวรอยแตกสูงสุดทั้ง 3 ระยะการทดสอบ คือ 1.636 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบความยาวรอยแตกกว้างสูงสุด

ในภาพที่ 4.4 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบความยาวรอยแตกกว้างขณะแฉ่งตัวสูงสุดของเหล็กกล้า SKD11 พบว่าที่รัศมีการดัดโค้งของ Bending block R70 มีความยาวรอยแตกกว้างสูงสุด โดยมีค่าของความยาวรอยแตกกว้างอยู่ที่ 3.41 มิลลิเมตร และรองลงมาก็คือรัศมีการดัดโค้งของ Bending block R125 ในขณะที่รัศมีการดัดโค้งของ Bending block R200 R300 และ R400 ไม่พบความยาวรอยแตกสูงสุด



ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความยาวรอยแตกกว้างขณะแฉ่งตัวของเหล็กกล้า SKD 11 ในทุก ๆ รัศมี Bending block

จากภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความยาวรอยแตกกว้างขณะแฉ่งตัวของเหล็กกล้า SKD 11 ในทุก ๆ รัศมี Bending block พบว่าที่รัศมีการดัดโค้งของ Bending block R70 มีความยาวรอยแตกกว้าง

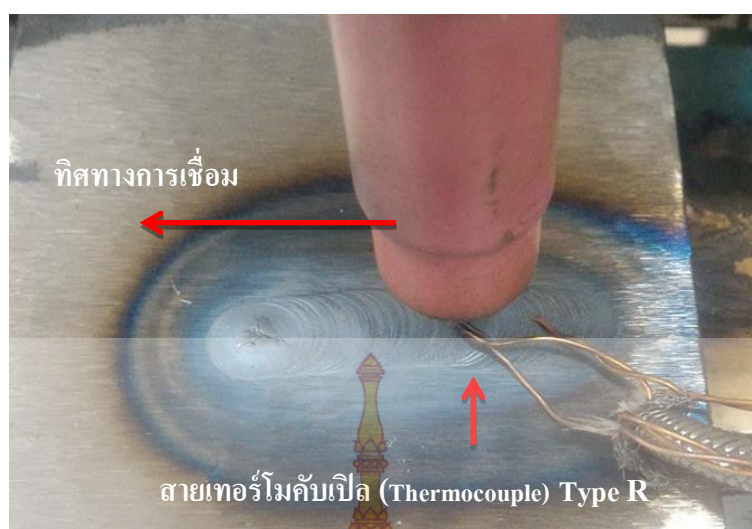
สูงสุด โดยมีค่าของความยาวรอยแตกกว้างอยู่ที่ 2.51 มิลลิเมตร และรองลงมาคือ รัศมีการดัดโค้งของ Bending block R125 โดยมีค่าของความยาวรอยแตกกว้างอยู่ที่ 1.64 มิลลิเมตร ในขณะที่รัศมีการดัดโค้งของ Bending block R200 R300 และ R400 ไม่พบความยาวรอยแตกสูงสุด

4.2 ผลการตรวจวัดประเมินอัตราการเย็นตัวของบ่อหลอม

การตรวจวัดประเมินอัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมจากการเชื่อมขณะแข็งตัวโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) Type R ในการวัดอุณหภูมิการเย็นตัวขณะเชื่อม (Cooling Curve) ณ ตำแหน่งกึ่งกลางแนวเชื่อมถูกวัดด้วยการจุ่มเทอร์โมคัปเปิล Type R ลงในบ่อหลอม (Weld Pool) อย่างทันทีทันใด และบันทึกในอุปกรณ์เก็บข้อมูล (Data Logger) ยี่ห้อ MIDI Logger รุ่น GL900 ดังแสดงในภาพที่ 4.6 และภาพที่ 4.7 แสดงถึงใช้สายเทอร์โมคัปเปิล Type R จุ่มลงไปในบ่อหลอมเพื่อวัดอัตราการเย็นตัวในขณะที่ภาพที่ 4.8 แสดงการวัดอุณหภูมิอัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมจากการเชื่อมของเหล็กกล้า SKD11 จากนั้นนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยแตกกว้างสูงสุดที่ระดับความเครียดใดๆ และอุณหภูมิการเย็นตัวตลอดทั้งกลางแนวเชื่อมจะสามารถนำมาประมาณค่าขอบเขตความต้านทานการแตกกว้างขณะแข็งตัว ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ โดยแสดงดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.6 อุปกรณ์เก็บข้อมูล (Data Logger)



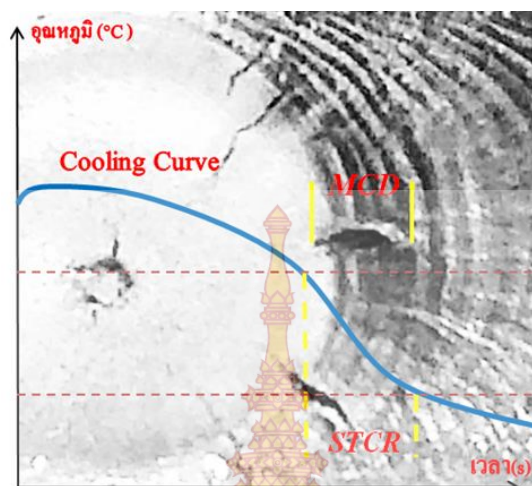
ภาพที่ 4.7 การใช้สายเทอร์โมคัปเปิล Type R จุ่มลงไปในห้องเชื่อมเพื่อวัดอัตราการเย็นตัว



ภาพที่ 4.8 การวัดอุณหภูมิอัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมจากการเชื่อมของเหล็กกล้า SKD11

จากข้อมูลในการใช้เทอร์โมคัปเปิลในการตรวจวัดประเมินอัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมจากการเชื่อมขณะแข็งตัวของเหล็กกล้า โดยข้อมูลจะเก็บเป็นไฟล์ Excel และนำไปสร้างกราฟอัตราการเย็นตัวของเหล็กกล้าแต่ละชนิด โดยกราฟอัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมของเหล็กกล้าแต่ละชนิดจะมี

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (C°) ต่อเวลา (S) ซึ่งค่าในกราฟนั้นจะแสดงลักษณะอัตราการเย็นตัวในการคำนวณหาช่วงอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการแตกร้าวขณะแข็งตัว ดังแสดงในภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (C°) ต่อเวลา (S) ของอัตราการเย็นตัว

โดยความเครียดที่เกิดขึ้นจะได้จาก Bending Block ที่รัศมีแตกต่างกัน ซึ่งจะมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$(\epsilon) = \frac{t}{2R + t} \times 100 \quad \text{สมการ.....(4.1)}$$

โดย : ϵ คือ ความเครียด หน่วยคือ เปอร์เซนต์

t คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ หน่วยคือ มิลลิเมตร

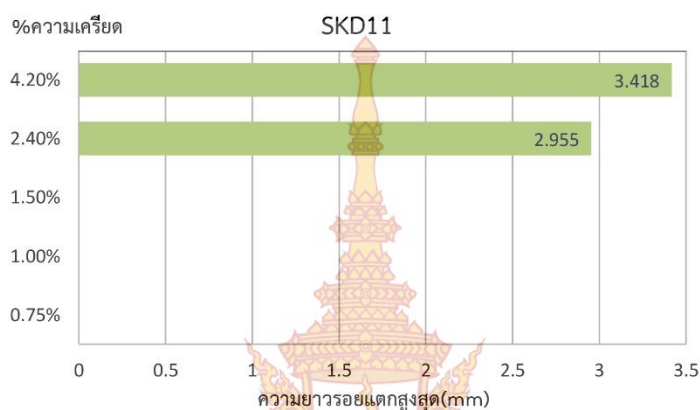
R คือ รัศมีของ Bending Block หน่วยคือ มิลลิเมตร

จากการคำนวณซึ่ง จะค่าความเครียดในแต่ละรัศมี Bending Block ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความเครียดในแต่ละรัศมี Bending Block

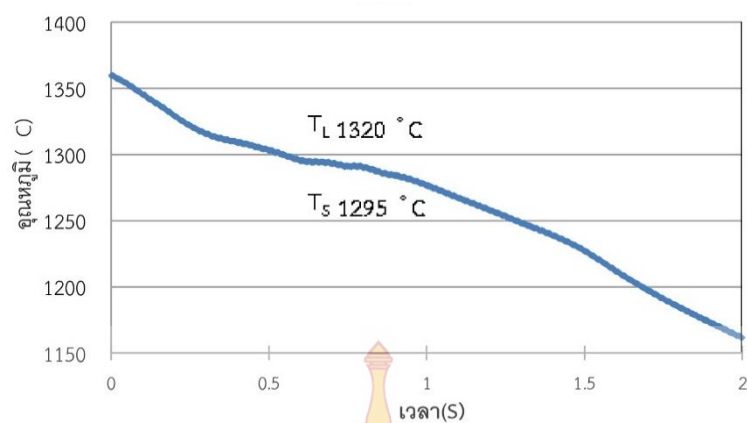
รัศมี Bending Block (mm)	เปอร์เซนต์ความเครียด (% ϵ)
r70	4.2
r125	2.4
r200	1.5
r300	1.0
r400	0.75

จากนั้นนำความยาวรอยแตกกว้างสูงสุดในแต่ละระดับความเครียดตั้งแต่ 0.75-4.20% ถูกลำมาสร้างความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 4.10 สังเกตได้ว่าความเครียดที่ 4.20 มีการขยายตัวของรอยแตกกว้างมากกว่าในทุกระดับของความเครียดที่เป็นแรงกระตุ้นทำให้เกิดรอยแตกกว้าง ในขณะที่ความเครียดตั้งแต่ 0.75-1.50% พบว่าแรงกระตุ้นทำให้เกิดรอยแตกกว้างยังมีน้อยเกินไปจึงทำให้ไม่ส่งผลต่อการเกิดรอยแตกกว้างขณะร้อนเกิดขึ้นได้เหมือนกับกับความเครียดที่ 2.40 และ 4.20%

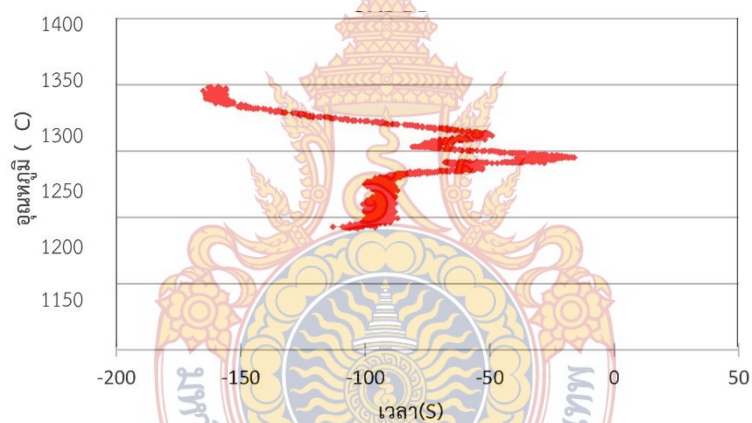


ภาพที่ 4.10 ค่าความเครียดต่อความยาวรอยแตกของเหล็กกล้า SKD11

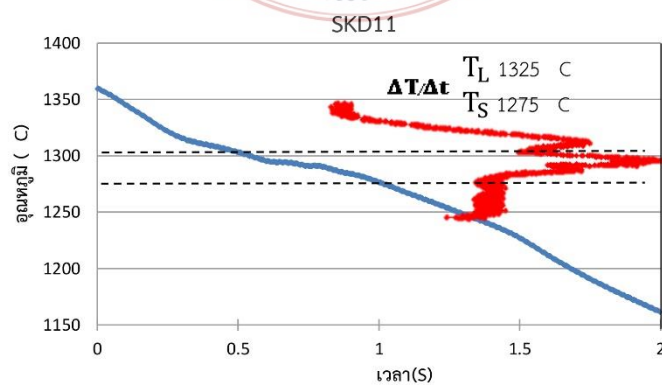
ในภาพที่ 4.11 แสดงอัตราการเย็นตัวบ่อหลอมของเหล็กกล้า SKD11 โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ต่อเวลา (S) ของอัตราการเย็นตัว พบว่าสามารถประมาณจุดหลอมเหลวของเหล็กกล้า SKD 11 เท่ากับ 1320°C และจุดอุณหภูมิในการเริ่มต้นเปลี่ยนเฟสจากของเหลวเป็นของแข็ง นั่นก็คือช่วงอุณหภูมิประมาณ 1295°C ซึ่งอุณหภูมิระหว่าง $1320-1295^{\circ}\text{C}$ เป็นช่วงของการเกิดรอยแตกกว้างขณะแข็งตัวของเหล็กกล้า SKD 11 และประกอบกับการได้รับแรงกระตุ้นจากความเครียดบนชิ้นงานจากภายนอกมีมากพอจึงทำให้เกิดรอยแตกกว้างเกิดขึ้นได้ โดยแสดงช่วงอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสดังภาพที่ 4.12 และภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.11 อัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมของเหล็กกล้า SKD11



ภาพที่ 4.12 ช่วงอุณหภูมิที่แตกตัวของเหล็กกล้า SKD11



ภาพที่ 4.13 อัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมและช่วงอุณหภูมิที่แตกตัวของเหล็กกล้า SKD11

ตารางที่ 4.2 อัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมของเหล็กกล้า SKD11

รัศมี Bending Block (mm)	ความเร็ว ในการเดิน หัวเชื่อม (Vw) (mm/s)	ความยาว รอยแตก สูงสุด (MCD) (mm)	เวลาที่ เคลื่อนที่ ถึงปลาย รอยแตก (s)	อัตรา การเย็น ตัว(CR) (°C/S)	ช่วง อุณหภูมิที่ แตกร้า (t*CR) (°C)	อุณหภูมิ ปลายรอย แตกร้า (MTC) (°C)
r70	0.7	3.418	4.882	50	244.10	1080.90
r125	0.7	2.955	4.221	50	211.05	1113.95
r200	0.7	0	0	50	0	0
r300	0.7	0	0	50	0	0
r400	0.7	0	0	50	0	0

จากตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง รัศมี Bending block ความยาวรอยแตกสูงสุด และ อัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมเชื่อมของเหล็กกล้า SKD 11 พบว่า โดยส่วนใหญ่อัตราการเย็นตัวจะมีค่า อยู่ที่ 50 °C/S แต่มีค่าความแตกต่างของช่วงอุณหภูมิที่แตกร้า และอุณหภูมิปลายแตกร้า ขึ้นอยู่กับ แรงกระตุ้นของความเครียดที่ มากหรือน้อยที่ได้บนชิ้นงานบ่อหลอมเชื่อมนั่นเอง

อย่างไรก็ตามความไวในการแตกร้าขณะแข็งตัวเชิงปริมาณจะถูกประเมินผ่านเส้นโค้งความเหนียวนี้ซึ่ง สามารถอธิบายอิทธิพลทั้งด้านช่วงอุณหภูมิ SCTR ของบ่อหลอมเชื่อมและขีดจำกัดความเครียดขณะเชื่อมได้ โดยช่วงอุณหภูมิเกิดการแตกร้าขณะแข็งตัว (SCTR) สามารถคำนวณหาจากความสัมพันธ์ของอัตราการเย็นตัว (CR) ความยาวรอยแตกร้า (CL) และความเร็วเชื่อม (Vw) ดังสมการที่ (4.2) ต่อไปนี้

$$SCTR = CR \times \frac{CL}{Vw} \quad \text{สมการ.....(4.2)}$$

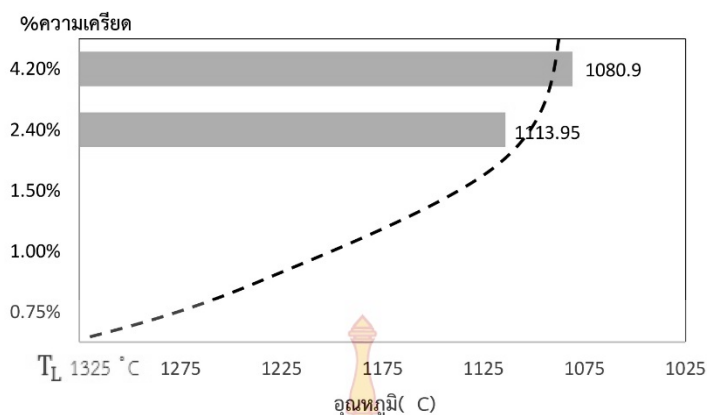
เมื่อ

SCTR คือ ช่วงอุณหภูมิวิกฤติแข็งเปราะ หน่วยคือ (°C)

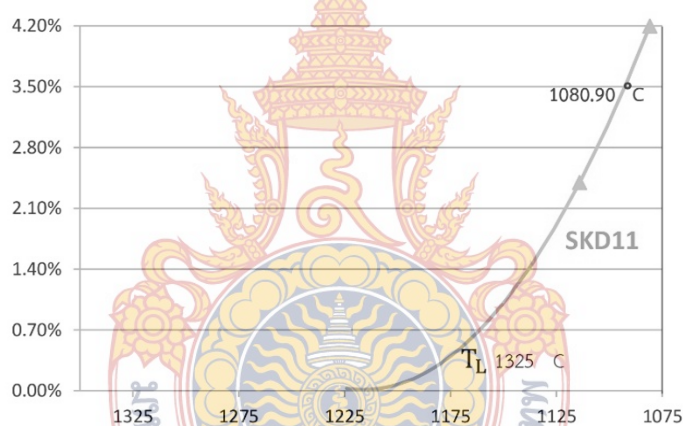
CR คือ อัตราการเย็นตัว หน่วยคือ (°C)

CL คือ ความยาวรอยแตกร้า หน่วยคือ (mm)

Vw คือ ความเร็วในการเดินหัวเชื่อม หน่วยคือ (mm/s)



ภาพที่ 4.14 เส้นโค้งความเหนียวในการแตกร้าขณะแข็งตัวของเหล็กกล้า SKD11



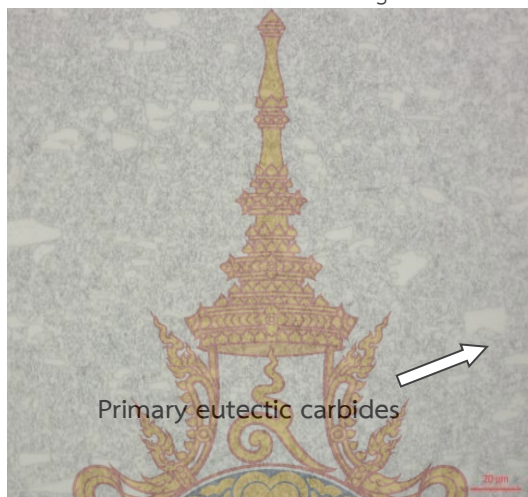
ภาพที่ 4.15 การประมาณค่าขอบเขตช่วงอุณหภูมิเกิดการแตกร้าขณะแข็งตัวของเหล็กกล้า SKD11

จากภาพที่ 4.14 และ 4.15 แสดงเส้นการประมาณค่าขอบเขตช่วงอุณหภูมิเกิดการแตกร้าขณะแข็งตัวที่ระดับความเครียดวิกฤติที่อุณหภูมิสูง หรือ เส้นโค้งความเหนียว พบว่าเส้นค่าขอบเขต SCTR ของบ่อหลอมเชื่อมของเหล็กกล้า SKD11 มีขอบเขตที่กว้างของระดับความเครียด 4.20%, มากกว่าระดับความเครียดอื่น ๆ ส่งผลต่อโอกาสเกิดการแตกร้าขณะแข็งตัวเนื่องจากค่าขอบเขต SCTR ที่กว้างขึ้นแสดงถึงช่วงสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่มากตามไปด้วยทำให้มีแนวโน้มที่ขอบเกรนจะแยกจากกันได้ง่ายขึ้นขณะกำลังแข็งตัว (Solidification) [7]

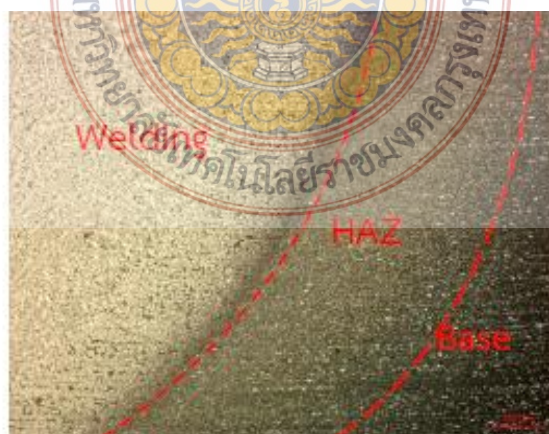
4.3 ผลการตรวจสอบวิเคราะห์ทางโครงสร้างจุลภาค

ในภาพที่ 4.16 แสดงโครงสร้างจุลภาคพื้นฐานของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้า SKD 11 ที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่ามีลักษณะ Primary eutectic carbides ที่มีขนาดใหญ่ แสดงดังลูกศรสีขาวชี้ และในภาพที่ 4.17 แสดงบริเวณพื้นที่กระต้อนของแนวเชื่อมระหว่าง Weld zone กับ Base metal ที่

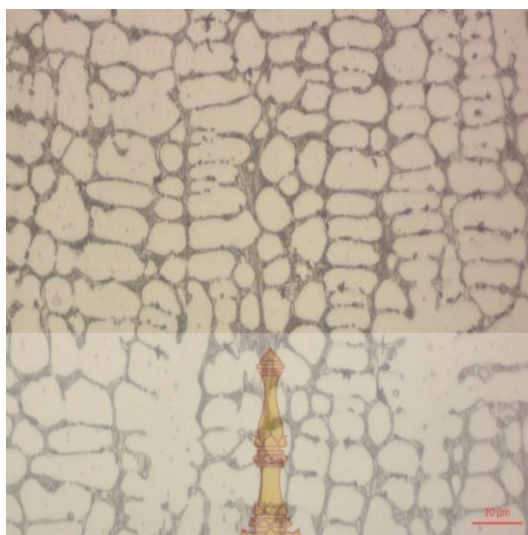
กำลังขยาย 50 เท่า พบว่าที่บริเวณพื้นกระทะร้อนมีลักษณะโครงสร้างของ Eutectic carbides มีรูปร่างขนาดเล็กเนื่องจากได้รับอิทธิพลความร้อนจากบ่อหลอมเชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางรูปร่างของโครงสร้าง carbides ที่ขนาดเล็กและละเอียดขึ้น ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ carbides ที่บริเวณกระทะร้อนอาจส่งผลต่อค่าความแข็งที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจน ในภาพที่ 4.19 อย่างไรก็ตาม ในภาพที่ 4.18 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคที่บริเวณแนวเชื่อม พบว่ามีลักษณะเป็นโครงสร้างของเดนไดรที่พุ่งเข้าหาบ่อหลอมเชื่อมจากการเย็นตัวและอาจจะเป็นเดนไดรต์คาร์ไบด์อย่างไรก็ตามเพื่อความถูกต้องชัดเจนต้องผ่านการวิเคราะห์ด้วยกล้อง Scanning electron microscope



ภาพที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า SKD 11 ที่กำลังขยาย 500 เท่า



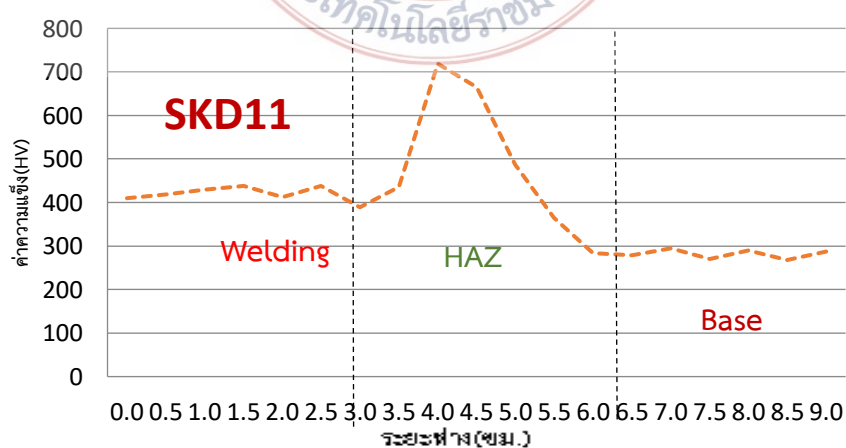
ภาพที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทะร้อน 50 เท่า



ภาพที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้า SKD 11 ที่กำลังขยาย 500 เท่า

4.4 ผลการทดสอบความแข็งแบบจุลภาค

ในภาพที่ 4.19 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้า SKD11 พบว่า ที่บริเวณเนื้อเชื่อมค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 400-430 HV ในขณะที่บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) พบว่ามีค่าความแข็งอยู่ที่ 300-710 HV และในบริเวณโลหะเชื่อม (Base Metal : BM) ของเหล็กกล้า SKD 11 พบว่ามีค่าความแข็งอยู่ที่ 290-300 HV อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าบริเวณกระทบร้อนมีค่าความแข็งสูงกว่าบริเวณเนื้อเชื่อมและโลหะเชื่อมเนื่องจากเป็นบริเวณที่ได้ความร้อนอยู่ใกล้เคียงบ่อหลอมเชื่อมแต่บริเวณนี้ไม่มีการหลอมละลายซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงออสเทนไนต์ทำให้เกิดเกรนโตเมื่อได้รับความร้อนและเย็นตัวเร็วทำให้มีค่าความแข็งสูง



ภาพที่ 4.19 ค่าความแข็งของเหล็กกล้า SKD11

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาและทดลองความสามารถในการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 จากผลการทดลอง และอภิปรายผลสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

1) จากการทดสอบเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อม TIG welding โดยการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพในทุกๆครั้งมี Bending Block ซึ่งรัศมี Bending Block ที่น้อยจะทำให้เกิดความเครียดที่มากจึงทำให้ชิ้นงานทดสอบมีรอยแตกที่ยาว และการศึกษาอุณหภูมิการเย็นตัวและปริมาณความเครียดที่มีผลกระทบต่อการแตกร้าวขณะแข็งตัวเชิงปริมาณภายใต้เส้นโค้งความเหนียวที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่การที่มีแรงกระตุ้นจากภายนอกหรือการออกแบบรูปร่างบากร่องในการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าเครื่องมือ อาจทำให้ชิ้นงานเกิดความเครียดสูงในขณะการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ส่งผลทำให้มีความไวในการแตกร้าวที่เร็วขึ้น ซึ่งบริเวณรอยแตกร้าว นั้นเป็นบริเวณ mushy zone หรือบริเวณที่เป็นกึ่งของแข็งและของเหลวผสมกันซึ่งทำให้ง่ายต่อการแตกร้าว

2) เส้นโค้งความเหนียวของเนื้อเชื่อมจากผลการทดลองอัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมเชื่อมช่วงอุณหภูมิของการแตกร้าวของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้า SKD11 อยู่ระหว่างช่วงอุณหภูมิ 1325–1080.9 °C

3) โครงสร้างจุลภาคพื้นฐานของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้า SKD 11 มีลักษณะ Primary eutectic carbides มีขนาดใหญ่ และบริเวณพื้นที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมระหว่าง Weld zone กับ Base metal มีลักษณะโครงสร้างของ Eutectic carbides มีรูปร่างขนาดเล็กและละเอียดขึ้น และโครงสร้างทางจุลภาคที่บริเวณแนวเชื่อม มีลักษณะของเดนไดรต์ที่

4) การทดสอบความแข็งของเหล็กกล้า SKD11 ที่บริเวณเนื้อเชื่อมค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 400-430 HV ที่บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) มีค่าความแข็งอยู่ที่ 300-710 HV และในบริเวณโลหะเชื่อม (Base Metal : BM) ของเหล็กกล้า SKD 11 มีค่าความแข็งอยู่ที่ 290-300 HV

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยต่อไปควรศึกษาถึงพฤติกรรมการแตกร้าวของการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 เช่น เกี่ยวโครงสร้างโลหะวิทยาเชิงลึก ดูลักษณะของรอยแตกร้าวว่ามีธาตุสารมลทินที่ส่งผลต่อการแตกร้าวในวัสดุหลัก SKD11 หรือพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงเฟสที่ส่งผลต่อความไวทำให้เกิดรอยแตกร้าว และทดสอบการเชื่อมซ่อมจริงกับแม่พิมพ์เหล็ก SKD 11 เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาและประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมรถยนต์ภายในประเทศต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมหมาย สารมาท and วิชัย ฉัตรทินวัฒน์, "การวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อกำหนดวิธีปฏิบัติในการเชื่อมแบบทั้งสแตนอาร์คเพื่อลดการแตกร้าวสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นSKD11," มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2541.
- [2] เปรม บัวแก้ว, เอกชัย วารินศิริรักษ์, and อิศรทัต พึ่งอัน, "การวิเคราะห์กลไกการแตกร้าวในการเชื่อมซ่อมบำรุงแม่พิมพ์ฉีด," มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี, 2555.
- [3] Sindo Kou, "Welding Metallurgy," 2, Ed., ed, 2003.
- [4] ยงยุทธ ดุลยกุล, "ศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกระแสเชื่อมและส่วนผสมของแก๊สคลุมที่แตกต่างกันโดยกรรมวิธีการเชื่อมแม่," มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2551.
- [5] เดช เหมือนขาว, ยงยุทธ ดุลยกุล, and ชัยยุทธ มิงาม, "ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนโดยกระบวนการเชื่อมแพร่," มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีวิชัย, 2556.
- [6] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, สุรัตน์ ตรีวัฒนพงศ์, สุริยา ประสมทอง, and วรญา วัฒนจิตศิริ, "โครงสร้างจุลภาคและอัตราการสึกหรอของผิวเชื่อมอาร์คลวดไส้ฟลักซ์พอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C," มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี, 2559.
- [7] L. Aucott, D. Huang, H. B. Dong, S. W. Wen, J. Marsden, A. Rack, *et al.*, "A Three-Stage Mechanistic Model for Solidification Cracking During Welding of Steel," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 49, pp. 1674-1682, 2018/05/01 2018.

ประวัตินักวิจัย

ชื่อ-สกุล
วัน เดือน ปีเกิด
ที่อยู่

นายณัฐศักดิ์ สุวรรณนที
6 มกราคม 2531
สาขาวิศวกรรมการผลิตความแม่นยำสูง คณะ วิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่
แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

การศึกษา
2557

Master of Engineering (Welding Engineering) King Mongkut's
University of Technology Thonburi

2554

Bachelor of Engineering (Welding Engineering Technology)
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

ประสบการณ์การทำงาน
พ.ศ.2562 - ปัจจุบัน

อาจารย์สาขาวิศวกรรมการผลิตความแม่นยำสูง คณะ
วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

อีเมล

nattasak.s@mail.rmutk.ac.th



ประวัตินักวิจัย

ชื่อ-สกุล	นายฤทธิชัย เกาเนียม
วัน เดือน ปีเกิด	8 ตุลาคม 2520
ที่อยู่	สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
การศึกษา	
2556	Doctor of Engineering (D.Eng) (Mechanical Science and Engineering) Hiroshima University, JAPAN
2548	Master of Engineering (Welding Engineering) King Mongkut's University of Technology Thonburi
2545	Bachelor of Engineering (Production Engineering) King Mongkut's University of Technology Thonburi
2542	Diploma, Major in Mechanical Technology Rajamangala Institute of Technology, Bangkok Technical Campus
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2553 - ปัจจุบัน	อาจารย์สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อีเมล	rittichai.p@mail.rmuk.ac.th