



การศึกษาอิทธิพลของการเชื่อมไฟฟ้าต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค
ของเหล็กไมโครอัลลอยด์

A STUDY OF THE INFLUENCE OF ELECTRICAL WELDING
ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE
OF MICRO ALLOY STEELS.

ไตร กระระนันท์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2568

การศึกษาอิทธิพลของการเชื่อมไฟฟ้าต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค
ของเหล็กไมโครอัลลอยด์



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

A STUDY OF THE INFLUENCE OF ELECTRICAL WELDING
ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE
OF MICRO ALLOY STEELS.



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY
(Mechanical Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2025

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาอิทธิพลของการเชื่อมไฟฟ้าต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค
ของเหล็กไมโครอัลลอยด์

ของ

ไทร คระนันท์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวานิชกุล)

..... ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร็จ)

..... ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ ศรีธรรมรัตน์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรภัทร หล้าบุญเรือง)

ชื่อเรื่อง	การศึกษาอิทธิพลของการเชื่อมไฟฟ้าต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กไมโครอัลลอยด์
ผู้วิจัย	ไตร คะระนันท์
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
ปีการศึกษา	2568
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ประชา นุณยวานิชกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. ภาคภูมิ ศรีรมรื่น

งานวิจัยฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กไมโครอัลลอยด์ชั้น A572GR50 ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมไฟฟ้า ด้วยเทคนิคการเชื่อมแบบผ่านสี่ครั้ง ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้าไฮโดรเจนต่ำชนิด E7018 และ E8018 โดยมีการปรับกระแสการเชื่อมที่ 90 แอมป์และ 110 แอมป์ จากการศึกษาคุณสมบัติทางกลพบว่าเมื่อใช้ลวดเชื่อม E7018 ปรับกระแส 90 แอมป์ มีความแข็งแรงเฉื่อย(HB)ที่โลหะฐานอยู่ที่ 220 ที่บริเวณผลกระทบจากความร้อน 228.6 บริเวณรอยเชื่อม 207.9 ค่าความต้านแรงดึง 587.08 MPa ค่าการดูดซับพลังงาน 291 จูล เมื่อใช้กระแส 110 แอมป์ ชนิดลวดเชื่อมเป็น E7018 ค่าความแข็งแรงเฉื่อย(HB)ที่บริเวณผลกระทบจากความร้อน 223 บริเวณรอยเชื่อม 202.5 ค่าความต้านแรงดึง 625.95 MPa ค่าการดูดซับพลังงาน 284 จูล เมื่อเปลี่ยนลวดเชื่อมเป็น E8018 ความแข็งที่บริเวณเดียวกันเป็น 231.8 และ 250 ค่าความต้านแรงดึง 628.07 MPa ค่าการดูดซับพลังงาน 169.97 จูลตามลำดับ ในส่วนขององค์ประกอบทางเคมีที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้งสองที่บริเวณผลกระทบจากความร้อนมีองค์ประกอบธาตุคล้ายคลึงกันคือ ซิลิกอน แมงกานีสและเหล็ก ส่วนบริเวณแนวเชื่อมของลวดเชื่อม E7018 มีธาตุที่เพิ่มขึ้นคือคาร์บอนและลวดเชื่อม E8018 มีธาตุที่เพิ่มขึ้นคือ โครเมียมและทองแดง ในส่วนของการศึกษาโครงสร้างจุลภาคพบว่า การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 ที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์เป็นโครงสร้างพื้นฐานมีค่าการดูดซับการกระแทกมากที่สุด ลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 ที่มีโครงสร้างเพิร์ลไรต์เป็นโครงสร้างพื้นฐานมีค่าการทดสอบแรงดึงและค่าการทดสอบความแข็งแรงมากที่สุด ผลการวัดขนาดเกรนพบว่า ลวดเชื่อม E7018 กระแส 90 และ 100 แอมป์ มีขนาดเกรนที่ 12.2 และ 13. μm ที่ผลกระทบจากความร้อน ส่วนบริเวณแนวเชื่อมมีขนาด 10.8 และ 11.9 ตามลำดับ และลวดเชื่อม E8018 กระแส 110 แอมป์ มีขนาดเกรนที่ 13.5 μm ที่ผลกระทบจากความร้อน ส่วนบริเวณแนวเชื่อมไม่สามารถหาขนาดได้

คำสำคัญ : เหล็กไมโครอัลลอยด์, โครงสร้างจุลภาค, สมบัติทางกล

Title	A STUDY OF THE INFLUENCE OF ELECTRICAL WELDING ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF MICRO ALLOY STEELS.
Author	TRI KHARANAN
Degree	DOCTOR OF PHILOSOPHY
Academic Year	2025
Thesis Advisor	Associate Professor Pracha Bunyawichakul
Co Advisor	Assistant Professor Parkpoom Sriromreun

This research aims to investigate the mechanical properties and microstructural characteristics of A572GR50 microalloy steel subjected to electric welding using a four-pass technique with low-hydrogen electrode wires E7018 and E8018. The welding currents were set at 90 and 110 amperes. The study found that for E7018 at 90 A, the average hardness (HB) was 220 in the base metal, 228.6 in the heat-affected zone, and 207.9 in the weld zone, with a tensile strength of 587.08 MPa and energy absorption of 291 Joules. At 110 A, the values slightly increased, with hardnesses of 223 and 202.5, tensile strength of 625.95 MPa, and energy absorption of 284 Joules. For E8018 at 110 A, the hardness reached 231.8 and 250, with a tensile strength of 628.07 MPa and energy absorption of 169.97 Joules. Chemical composition analysis revealed similar elements such as silicon, manganese, and iron across weld regions, with increased carbon in E7018 and higher chromium and copper in E8018. Microstructural examination showed that E7018 with a ferrite-based structure exhibited the highest impact toughness, while E8018 with a pearlite-based structure demonstrated the highest tensile strength and hardness. Grain size measurements indicated average grain sizes of 12.2–13.0 μm in heat-affected zones and 10.8–11.9 μm in weld zones for E7018, whereas E8018 at 110 A exhibited a grain size of approximately 13.5 μm in the heat-affected zone. These findings suggest that the type of electrode and welding current significantly influence the mechanical and microstructural properties of the welded microalloy steel.

Keyword : Mechanical properties, Microstructure, Arc-welding process, Microalloyed steel

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ผู้จัดทำงานวิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวานิชกุล รองศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ ศิริมรินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ แนวทางการแก้ปัญหา และทุนการตีพิมพ์งานวิจัย ระหว่างจัดทำงานวิจัยนี้ ด้วยความเอาใจใส่จนทำให้งานวิจัยครั้งนี้บรรลุเป้าหมายที่ตั้งเอาไว้ และขอขอบคุณ ประธานและกรรมการสอบทุกท่านที่สละเวลามาช่วยชี้แนะปรับปรุงให้งานวิจัยถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ผู้จัดทำขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอน แนะนำ และให้ความรู้แก่คณะผู้จัดทำ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างสูงที่มีส่วนทำให้งานวิจัยมีคุณค่ามากยิ่งขึ้น

ผู้จัดทำขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่อำนวยความสะดวก ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัยขอขอบคุณเพื่อนทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือแนะนำจนทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้จัดทำขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่านที่อำนวยความสะดวก และให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย

ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการวิศวกรรมนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่นำไปศึกษาไม่มากนักน้อยต่อไป คุณค่าและประโยชน์ จากงานวิจัยทางวิศวกรรมนี้ขอมอบให้กับครอบครัวและผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุนคณะผู้จัดทำในการศึกษาทั้งหมด

ไตร กระจะนันท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มา	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	3
ขอบเขตของโครงการวิจัย	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
ทฤษฎีไมโครอัลลอยด์	5
ไมโครอัลลอยด์และความแข็งแรง	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	49
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	76
การดำเนินการวิจัย.....	76
3.1 การเตรียมชิ้นงานในการเชื่อม	76
3.2 กรรมวิธีในการเชื่อม	77
3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ (Specimen)	80

3.4 วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการดำเนินงาน.....	81
3.5 การทดสอบความแข็งแรงแบบบรินเนลล์.....	87
3.6 การทดสอบความแข็งแรง.....	88
3.7 การทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี.....	89
3.8 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค.....	90
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	93
4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล.....	93
4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี.....	98
4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	104
4.4 การวิเคราะห์ขนาดเกรน.....	124
4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ฮอลล์-เพทซ์.....	135
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และเสนอแนะ.....	137
5.1 สรุปผลอภิปรายผล.....	137
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	141
บรรณานุกรม.....	142
ภาคผนวก.....	145
ภาคผนวก ก.....	146
ภาคผนวก ข.....	148
ภาคผนวก ค.....	152
ภาคผนวก ง.....	159
ภาคผนวก จ.....	162
ภาคผนวก ฉ.....	164
ประวัติผู้เขียน.....	169



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของกระบวนการเชื่อม	10
ตาราง 2 รายละเอียดของลวดเชื่อมแต่ละประเภท (AWS A5.1).....	15
ตาราง 3 ปัญหาและข้อบกพร่องในรอยเชื่อม	21
ตาราง 4 Magnification-Jeffries' Multiplier	46
ตาราง 5 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม	78
ตาราง 6 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า A572GR50.....	82
ตาราง 7 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม E 7018	83
ตาราง 8 ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อม E8018	84
ตาราง 9 ผลการทดสอบความแข็งบริเวณโลหะฐาน (BM)	95
ตาราง 10 ผลการทดสอบความแข็งบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ)	95
ตาราง 11 ผลการทดสอบความแข็งบริเวณแนวเชื่อม (FZ)	95
ตาราง 12 ผลการทดสอบความแข็งแรง	96
ตาราง 13 ผลการทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปีของลวดเชื่อม E7018	97

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 วงจรไฟฟ้าของกระบวนการเชื่อม SMAW.....	8
ภาพประกอบ 2 บริเวณที่เกิดกระบวนการเชื่อม SMAW	9
ภาพประกอบ 3 รูปร่างเส้น V/A ของหม้อแปลงหรือแบตเตอรี่	11
ภาพประกอบ 4 นิยามเส้นความลาด (Slope)	12
ภาพประกอบ 5 สัญลักษณ์ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS	17
ภาพประกอบ 6 บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม	20
ภาพประกอบ 7 รอยต่อชนแบบเปิดร่อง (Open - roots)	26
ภาพประกอบ 8 รอยต่อชนแบบปิดร่อง (Closed - roots)	26
ภาพประกอบ 9 รอยต่อชนแบบตัววีเดี่ยว (Single V-groove).....	27
ภาพประกอบ 10 หัวกดและรอยกดในการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์	30
ภาพประกอบ 11 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve)	33
ภาพประกอบ 12 ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบการกระแทก	35
ภาพประกอบ 13 ชิ้นทดสอบการกระแทกแบบไอซอด (Izod test specimen).....	36
ภาพประกอบ 14 ชิ้นทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy test specimen).....	37
ภาพประกอบ 15 ลักษณะการทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี	37
ภาพประกอบ 16 เฟสไดอะแกรมของเหล็ก-คาร์บอน (Iron-Carbon Phase Diagram)	41
ภาพประกอบ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมเหล็กกล้า HSLA และเฟสไดอะแกรมของเหล็ก-คาร์บอน	41
ภาพประกอบ 18 Spektor's Method	43
ภาพประกอบ 19 Comparison Method.....	45
ภาพประกอบ 20 Planimetric Method.....	47

ภาพประกอบ 21 Intercept Method	48
ภาพประกอบ 22 ชิ้นงานบากร่องวีสำหรับกระบวนการเชื่อม	77
ภาพประกอบ 23 สัญลักษณ์ในการเชื่อม	78
ภาพประกอบ 24 ตัวอย่างแนวเชื่อม (ก) กระแสไฟฟ้าที่เชื่อม 90 A (ข) กระแสไฟฟ้าที่เชื่อม 110 A.....	79
ภาพประกอบ 25 ชั้นแนวเชื่อม	79
ภาพประกอบ 26 หน้าตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A	79
ภาพประกอบ 27 หน้าตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A	80
ภาพประกอบ 28 แบบจำลองการตัดชิ้นงานทดสอบ	81
ภาพประกอบ 29 เครื่องเชื่อม SMAW ยี่ห้อ Miller รุ่น CST 280.....	83
ภาพประกอบ 30 เครื่องตัดโลหะ ยี่ห้อ BUEHLER รุ่น BETA	84
ภาพประกอบ 31 เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ ยี่ห้อ AFFRI รุ่น BREVETTI	85
ภาพประกอบ 32 เครื่องทดสอบความแข็งแรง ยี่ห้อ SATEC รุ่น Autograph AG-IS 100kN	85
ภาพประกอบ 33 เครื่องทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี ยี่ห้อ Zwick Roell รุ่น PSW750	86
ภาพประกอบ 34 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) ยี่ห้อ ZEISS รุ่น Axio Observer 3 materials	87
ภาพประกอบ 35 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น SU350087	87
ภาพประกอบ 36 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ มาตรฐาน ASTM E10-96	88
ภาพประกอบ 37 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรง มาตรฐาน ASTM E 8M.....	89
ภาพประกอบ 38 ชิ้นงานทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี มาตรฐาน ASTM E 23	90
ภาพประกอบ 39 ชิ้นงานทดสอบโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 ด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A	91
ภาพประกอบ 40 ชิ้นงานทดสอบโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 ด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A	92

ภาพประกอบ 41 ชิ้นงานทดสอบโครงสร้างจุดภาคที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 ด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A	92
ภาพประกอบ 42 ตำแหน่งที่ทำการทดสอบความแข็งในแต่ละบริเวณ	94
ภาพประกอบ 43 ผลเปรียบเทียบ Impact Energy ของชิ้นงานทั้งสี่รูปแบบ	98
ภาพประกอบ 44 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A	100
ภาพประกอบ 45 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A	100
ภาพประกอบ 46 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A	101
ภาพประกอบ 47 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A	101
ภาพประกอบ 48 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A	102
ภาพประกอบ 49 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเฟสภายในบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A	102
ภาพประกอบ 50 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 ที่กำลังไฟฟ้า 110 แอมแปร์	103
ภาพประกอบ 51 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในบริเวณโลหะบริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 ที่กำลังไฟฟ้า 110 แอมแปร์	103
ภาพประกอบ 52 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในบริเวณโลหะบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่	104
ภาพประกอบ 53 แสดงตำแหน่งตรวจสอบโครงสร้างจุดภาคบริเวณแนวเชื่อม (FZ)	105
ภาพประกอบ 54 โครงสร้างจุดภาคบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 2500x	105

ภาพประกอบ 55 ประเภทของโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 10000x.....	106
ภาพประกอบ 56 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A.....	106
ภาพประกอบ 57 ประเภทโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 10000x	107
ภาพประกอบ 58 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018.....	107
ภาพประกอบ 59 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018.....	108
ภาพประกอบ 60 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018.....	108
ภาพประกอบ 61 แสดงตำแหน่งตรวจสอบโครงสร้างระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ)	109
ภาพประกอบ 62 โครงสร้างจุลภาคระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 1000x.....	110
ภาพประกอบ 63 ความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 1000x	110
ภาพประกอบ 64 โครงสร้างจุลภาคระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 1000x.....	111
ภาพประกอบ 65 ความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 1000x	111

ภาพประกอบ 66 โครงสร้างระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความ
ร้อน (HAZ) ที่ ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์
กำลังขยาย 300 เท่า 112

ภาพประกอบ 67 โครงสร้างระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความ
ร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการและโครงสร้างบริเวณโลหะฐาน (BM) เชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า
E8018 กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ กำลังขยาย 300 เท่า 112

ภาพประกอบ 68 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่าน
กระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 2500x 113

ภาพประกอบ 69 ประเภทของโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่
ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแส..... 114

ภาพประกอบ 70 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่าน
กระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 2500x 114

ภาพประกอบ 71 ประเภทของโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่
ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 10000x..... 115

ภาพประกอบ 72 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่าน
กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ กำลังขยาย 300 เท่า
..... 115

ภาพประกอบ 73 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่าน
กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ กำลังขยาย 2500 เท่า
..... 116

ภาพประกอบ 74 สดงตำแหน่งตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน
(HAZ) กับบริเวณโลหะฐาน (BM)..... 116

ภาพประกอบ 75 ความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคระหว่างบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความ
ร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย
1000x 117

ภาพประกอบ 76 ความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคระหว่างบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 1000x	118
ภาพประกอบ 77 โครงสร้างระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการและโครงสร้างบริเวณโลหะฐาน (BM) ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018	119
ภาพประกอบ 78 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 2500x	120
ภาพประกอบ 79 ประเภทของโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 10000x	120
ภาพประกอบ 80 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 2500x	121
ภาพประกอบ 81 ประเภทของโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 10000x	121
ภาพประกอบ 82 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ กำลังขยาย 500 เท่า	122
ภาพประกอบ 83 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ กำลังขยาย 5000 เท่า	122
ภาพประกอบ 84 รอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ระดับจุลภาคกำลังขยาย 7000x	123
ภาพประกอบ 85 รอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A บริเวณแนวเชื่อม (FZ) ระดับจุลภาค กำลังขยาย 7000x	124
ภาพประกอบ 86 รอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A บริเวณแนวเชื่อม (FZ) ระดับจุลภาค กำลังขยาย 7000x	124

ภาพประกอบ 87 Intercept Method หาขนาดเกรนบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 500x.....	126
ภาพประกอบ 88 Intercept Method หาขนาดบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 500x	126
ภาพประกอบ 89 ขนาดเกรนบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า.....	127
ภาพประกอบ 90 Intercept Method หาขนาดเกรนระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 500x	128
ภาพประกอบ 91 Intercept Method หาขนาดเกรนระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 500x.....	129
ภาพประกอบ 92 Intercept Method หาขนาดเกรนบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 500x.....	130
ภาพประกอบ 93 Intercept Method หาขนาดเกรนบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 500x	130
ภาพประกอบ 94 Intercept Method หาขนาดเกรนระหว่างบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 500x	131
ภาพประกอบ 95 Intercept Method หาขนาดเกรนระหว่างบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 500x.....	132
ภาพประกอบ 96 Intercept Method หาขนาดเกรนบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์.....	133
ภาพประกอบ 97 Intercept Method หาขนาดเกรนบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 500x	134

ภาพประกอบ 98 Intercept Method หาขนาดเกรนบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 500x..... 134

ภาพประกอบ 99 Intercept Method หาขนาดเกรนบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAWด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์..... 135



บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มา

เทคโนโลยีวัสดุนั้นมีบทบาทสำคัญในด้านต่างๆ ซึ่งวัสดุจัดเป็นปัจจัยสำคัญที่ขาดไม่ได้ในการดำรงอยู่ของมนุษย์ตั้งแต่ยุคโบราณจนถึงปัจจุบัน เช่น เสื้อผ้า สิ่งก่อสร้าง ที่อยู่อาศัย ยานพาหนะ การรักษาพยาบาล หรือสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ นอกจากเทคโนโลยีวัสดุจะช่วยให้มนุษย์สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ด้วยความสะดวกสบายเพิ่มมากขึ้นแล้วปัจจุบันเทคโนโลยีวัสดุได้สร้างผลกระทบที่สำคัญต่อระบบเศรษฐกิจเนื่องจากการนำเทคโนโลยีวัสดุไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม(1)

ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา มีการพัฒนาด้านเทคโนโลยีวัสดุอย่างต่อเนื่อง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพและประสิทธิภาพของวัสดุให้ดียิ่งขึ้น และเพื่อนำวัสดุมาประยุกต์ใช้ประโยชน์และตอบสนองต่อความต้องการในด้านต่างๆ เช่น ยานยนต์ ยานอวกาศ ไทโรนาคอม อิเล็กทรอนิกส์ การแพทย์ การทหาร และสิ่งก่อสร้าง เป็นต้น ทั้งนี้เทคโนโลยีวัสดุสมัยใหม่จะต้องมีขนาดเล็ก สามารถตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อม ดำรงอยู่ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงมีความแข็งแรงทนทาน ทนต่อการกัดกร่อนและการขีดสีและไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม (จุฑาธิป 2554) หนึ่งในนั้นคือการพัฒนาวัสดุประเภทเหล็กไมโครอัลลอยด์(2)

เหล็กกล้าในกลุ่มไมโครอัลลอยด์หรือเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงอัลลอยด์ต่ำ(HSLA) ในปัจจุบันมีการใช้งานค่อนข้างสูง เนื่องจากเหล็กประเภทนี้มีคุณสมบัติโดดเด่นในเรื่องของความสามารถในการรับแรงได้สูง ป้องกันการกัดกร่อนได้ดี สามารถเชื่อมได้ง่าย มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดีเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าคาร์บอนทั่วไป

การใช้งานเหล็กประเภทไมโครอัลลอยด์เริ่มมีขึ้นในยุคอุตสาหกรรมการต่อเรือขนาดใหญ่ การเดินท่อส่งน้ำมันขนาดใหญ่และการก่อสร้างโครงสร้างที่ต้องการป้องกันการกัดกร่อน โดยเฉพาะโครงสร้างที่ต้องเจอกับสภาวะสิ่งแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนอย่างรุนแรง ดังจะเห็นได้จากการเริ่มเปลี่ยนชนิดของเหล็กกล้าในการเดินท่อน้ำมันปิโตรเลียมของอเมริกา(API) จากเหล็กเกรด API 5 L X52 เป็นเกรด API 5L X70-80(3) ซึ่งมีความสามารถในการต้านการกัดกร่อนได้ดีขึ้น

นอกจากการพัฒนาเหล็กไมโครอัลลอยด์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและการก่อสร้างแล้ว วิศวกรทั่วโลกยังมีการพัฒนาเพื่อใช้ในโครงสร้างประเภทอื่นด้วย เนื่องด้วยเหล็กไมโครอัลลอยด์มีความแข็งแรงสูงเมื่อนำมาใช้งานในการรับแรงที่เท่ากันจะมีขนาดเล็กกว่าเหล็กกล้า

คาร์บอนทั่วไป ในประเทศญี่ปุ่นมีการนำเหล็กไมโครอัลลอยด์มาพัฒนาโดยการเติมธาตุต่างๆ เข้าไปเพื่อเพิ่มความสามารถ ในการเชื่อมให้มากขึ้น เช่นตัวถังรถยนต์ เพลาช้อเหวียง และชิ้นส่วนอื่นๆ(4)

ข้อได้เปรียบของเหล็กไมโครอัลลอยด์คือ ความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการทางความร้อนเหมือนเหล็กคาร์บอนทั่วไปซึ่งต้องมีการอบและชุบจึงจะได้รับความแข็งแรงตามต้องการทำให้ต้นทุนในการผลิตของเหล็กไมโครอัลลอยด์ต่ำมีระยะเวลาในการผลิตสั้น การผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลในภาพรวมใช้เวลาอันน้อยลง จึงทำให้มีการใช้งานแพร่หลายมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะเหล็กไมโครอัลลอยด์แบบขึ้นรูปร้อน (Hot-Forge HSLA)(5)

การใช้งานเหล็กไมโครอัลลอยด์เพื่อผลิตเพลาส่งกำลัง มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับเพลาดังกล่าวโดยที่เพลามีขนาดเล็กที่สุด กระบวนการที่นิยมใช้คือการตีขึ้นรูปร้อนและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจะทำให้เพลามีความแข็งแรงและมีความเหนียวตามต้องการ (6) การทำให้เหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนและเย็นตัวลง (Direct Cooling) เป็นการควบคุมให้ขนาดของเกรนละเอียดขึ้นทำให้ ชิ้นงานได้ค่าความแข็งแรงตามต้องการ

ในการสร้างโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น อุโมงค์เรือ สะพานข้ามช่องแคบในทะเล หรือแพลตฟอร์มกลางทะเล ในสมัยยุคเริ่มต้นประสบกับปัญหาเหล็กโครงสร้างเกิดการกัดกร่อนจากหมอกเกลือจากทะเลหรือเกิดการกัดเซาะจากซัลเฟตใต้ธรณี วิศวกรในยุคนั้นแก้ปัญหาด้วยการนำเหล็กไปชุบสังกะสี (Galvanized plating) เพื่อให้โครงสร้างรับภาระการกัดกร่อนได้ดีขึ้น แต่ปัญหาที่ตามมาคือบริเวณที่มีการเชื่อมมักเป็นจุดที่อ่อนแอมากที่สุดของโครงสร้างเนื่องจาก เมื่อมีการเชื่อมในบริเวณนั้น พบว่าสังกะสีจะหลุดร่อนออกไป ทำให้โครงสร้างเกิดสนิมและกัดกร่อนไปตามอายุการใช้งาน

ประเทศญี่ปุ่นเป็นประเทศเริ่มแรกที่มีการพัฒนาเหล็กโครงสร้างที่ต้านทานการกัดกร่อนในกลุ่มของเหล็กเกรดไมโครอัลลอยด์ (Corten A, B)(7) เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างในสภาวะการกัดกร่อนจากน้ำทะเล ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าโครงสร้างมีการสูญเสียมวลต่อปีในปริมาณที่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับเหล็กโครงสร้างทั่วไป แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นพบว่า ในบริเวณรอยเชื่อมหรือใกล้กับรอยเชื่อมยังคงเป็นปัญหาที่ยังเกิดขึ้นอยู่เนื่องด้วยบริเวณดังกล่าวเมื่อมีการเชื่อมจะมีความร้อนเกิดขึ้นทำให้บริเวณใกล้กับรอยเชื่อมมีความแข็งแรงน้อยลง

การเชื่อมไฟฟ้า (Electric Welding) เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการยึดติดโครงสร้างเพื่อรับน้ำหนัก ข้อดีของการเชื่อมไฟฟ้า คือ มีราคาถูกลงกว่าวิธีการเชื่อมแบบอื่น โดยเฉพาะโครงสร้างที่มีความหนาหลายๆ การเตรียมหน้างานสามารถทำได้ในระยะเวลาอันสั้น ทั้งการเชื่อมแบบสร้างชิ้น

ใหม่หรือการเชื่อมเพื่อซ่อมบำรุง แต่ข้อเสีย คือ รอยเชื่อมมักเป็นจุดอ่อนที่ทำให้โครงสร้างเกิดการแตกหัก เพราะเมื่อทำการเชื่อมจะเกิดความร้อนทำให้ชิ้นงานที่เป็นเหล็กฐานเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อเย็นตัวลงบริเวณใกล้ๆ กับรอยเชื่อมมีความเค้นตกค้าง (Residual Stress) เนื่องจากการที่ชิ้นงานเย็นตัวลงไม่เท่ากันหรืออาจเว้นระยะห่างในการเชื่อมน้อยเกินไป เมื่อใช้งานไปได้ในระยะเวลาหนึ่งมักจะเกิดการแตกหัก(8)

จากการสัมมนาเทคนิคงานเชื่อมกับสมาคมงานเชื่อมในประเทศไทยเมื่อปี ค.ศ. 2020-2021 ได้มีการหยิบยกปัญหางานเชื่อมเหล็กไมโครอัลลอยด์ด้วยเลวดเชื่อมที่แนะนำจากผู้ผลิต (Yawata, Gemini) แนะนำกระแสที่ใช้ควรอยู่ในช่วง 90-140 แอมป์ ขึ้นอยู่กับความหนาและตำแหน่งชิ้นงาน หนึ่งในปัญหาสำคัญคือเมื่อต้องเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนามากกว่า 8 มม. และอยู่แนวตั้ง ช่างเชื่อมมักปรับกระแสสูงจากปกติที่ 90-100 แอมป์ไปที่ 130-140 แอมป์เพื่อให้ความลึกของจุดหลอมเหลวมีค่ามากและเดินแนวเชื่อมสองรอบหรือรอบเดียว ปัญหาที่พบคือโลหะในบ่อหลอมมีการไหลออกจากแนวเชื่อมทำให้รอยเชื่อมไม่สมมาตรและมีความแข็งแรงและความเหนียวต่ำลง ดังนั้นงานวิจัยจึงออกแบบเทคนิคงานเชื่อมใหม่โดยใช้การเชื่อมแบบ multipass แบบสี่รอบเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว(9)

ในงานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นถึงประโยชน์ของเหล็กไมโครอัลลอยด์ ในการนำมาทำเป็นโครงสร้างด้วยการเชื่อมไฟฟ้า และต้องการศึกษาความแข็งแรงของรอยเชื่อม บริเวณใกล้รอยเชื่อมกับชนิดของลวดเชื่อมไฟฟ้าที่นิยมนำมาเชื่อมในประเทศไทย(ตามการแนะนำของผู้ผลิตลวดเชื่อม) นอกจากนี้ยังต้องการศึกษาผลกระทบของความร้อนที่เกิดจากการเชื่อมในบริเวณ Heat Affect Zone(HAZ) ในโครงสร้างแบบมหภาคและจุลภาค (Macro and Micro structure) จากผลการศึกษานี้จะทำให้วิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้างหรือผู้ที่ต้องการซ่อมบำรุงโครงสร้างสามารถประเมินความแข็งแรง อายุการใช้งานของโครงสร้างที่ผลิตจากไมโครอัลลอยด์ได้ว่าอายุการใช้งานสามารถใช้ได้ตรงตามที่ต้องการหรือไม่

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของเหล็กกล้าไมโครอัลลอยด์ที่เกิดจากการเชื่อมด้วยไฟฟ้า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของลวดเชื่อม
2. เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของรอยเชื่อมในเหล็กกล้าไมโครอัลลอยด์ กับโครงสร้างจุลภาคและมหภาค

ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ทดสอบเป็นเหล็กไมโครอัลลอยด์ชนิดทนการกัดกร่อน(HSLA)เกรด A572GR เกรด 50
2. ใช้กระบวนการเชื่อมแบบไฟฟ้า(Arc Welding) โดยควบคุมความเร็วในการเชื่อม ระยะห่างของรอยต่อ เปลี่ยนตัวแปรคือกระแสที่ใช้ในการเชื่อม ชนิดลวดเชื่อมเบอร์ E7010 และ E 8018
3. ลักษณะของชิ้นงานเป็นลักษณะแผ่นเพลตหนา 10 มิลลิเมตร และบากเป็นรูปตัววี เชื่อมต่อขนาดขึ้นทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน AWS A5.1/A5.1M
4. การปรับกระแสการเชื่อมใช้ขนาด 90, 110 แอมป์สำหรับลวดเชื่อม E7018 และกระแส ขนาด 110 แอมป์สำหรับลวดเชื่อม E8018
5. ศึกษาเฉพาะ ความต้านแรงดึง การดูดซับพลังงาน ความแข็ง โครงสร้างจุลภาค และ องค์ประกอบทางเคมี

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย

1. ได้ทราบถึงผลกระทบของการเชื่อมไฟฟ้าในวัสดุไมโครอัลลอยด์ที่ผ่านกระบวนการ เชื่อมที่ส่งผลกับพฤติกรรมทางกลของวัสดุไมโครอัลลอยด์
2. ได้องค์ความรู้ในการเลือกเหล็กไมโครอัลลอยด์และลวดเชื่อมมาทำการเชื่อมต่อเพื่อใช้ ในการทำโครงสร้าง ให้สามารถเลือกปรับกระแสในการเชื่อมไฟฟ้าได้เหมาะสมกับเกรด ของเหล็กไมโครอัลลอยด์
3. สามารถทำนายความต้านแรงดึงของโครงสร้างเหล็กไมโครอัลลอยด์ที่ต่อด้วยวิธีการ เชื่อมไฟฟ้า
4. สามารถนำผลการวิจัยไปศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของปัจจัยของธาตุอื่นที่มีผลกระทบต่อ ความแข็งแรงในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไมโครอัลลอยด์ เช่น Titanium, Niobium, Zirconium และธาตุ อื่น
5. นำผลงานวิจัยที่ได้ไปศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของความล้าจากการกัดกร่อน(Corrosion Fatigue)และการครีพ(Creep)

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีไมโครอัลลอยด์

ไมโครอัลลอยด์และความแข็งแรง

เหล็กไมโครอัลลอยด์เริ่มมีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 จนถึงปี 1980 เหล็กกล้าไมโครอัลลอยด์เป็นเหล็กกล้าที่แข็งตัวได้น้อยมีโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์เพิร์ลไลต์ (F-P) และให้ผลผลิตได้ถึง 420 MPa (60 Ksi) ยุคของเหล็กกล้าไร้สนิมสมัยใหม่เริ่มขึ้นด้วยความตั้งใจและวัตถุประสงค์ด้วย การห้ามค้ำน้ำมันของโอเปคในปี พ.ศ. 2516 ปัญหาคารขาดแคลนน้ำมันและการเพิ่มขึ้นของราคาทำให้เศรษฐกิจหดตัวของเศรษฐกิจตะวันตก และได้รับรู้อย่างรวดเร็วว่าแหล่งที่มาใหม่ของน้ำมันและก๊าซธรรมชาตินั้นนอกจากคาบสมุทรอาหรับนั้น ถูกต้อง ผลที่ตามมาของการตื่นตัวนี้คือความต้องการที่ชัดเจนสำหรับท่อส่งน้ำมันและก๊าซจากแหล่งที่มีเสถียรภาพทางการเมืองมากขึ้นในตลาด อย่างไรก็ตามคำถามที่ชัดเจนคือต่อไปจะต้องสร้างท่อส่งความยาวกี่พันกิโลเมตร

เศรษฐศาสตร์ของการออกแบบท่อต้องมีอัตราค่าผ่านทางที่เป็นไปได้สูงสุดต่อต้นทุนต่อหน่วยของการสร้างและบำรุงรักษาท่อ กลศาสตร์ของแข็งเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าความเค้นตามแนวเส้นรอบวงของท่อเป็นไปตามสมการที่ 1

$$s = PD/2t \quad (1)$$

โดยที่ P คือแรงดันในท่อ D เส้นผ่าศูนย์กลางท่อและ t ความหนาของผนังท่อ

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านข้อมูลในขณะที่ตัวหามีส่วนเกี่ยวข้องกับต้นทุนเงินทุนของการก่อสร้าง เห็นได้ชัดว่าอัตราส่วนที่สูงที่สุดเป็นไปได้มากที่สุดอย่างดี เนื่องจากความเค้นในการทำงานของโครงสร้างทางวิศวกรรมต้องไม่เกินเศษส่วนของความหนาท่อยิ่งค่า PD ที่สูงขึ้น รายได้ก็ต้องสูงขึ้นตามไปด้วย อุตสาหกรรมเหล็กทั่วโลกต้องเผชิญกับงานที่ยากลำบากในการจัดหาเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงในปริมาณที่มาก เหล็กชนิดนี้ยังต้องมีความเหนียวที่ดีและสามารถเชื่อมได้ดี (weldability) ใน พ. ศ. 2513 เหล็กที่มีความแข็งแรงสูงที่สุดมักได้รับการผ่านกระบวนการทางความร้อน อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ก็ยังคงให้ผลลัพธ์ที่ยังไม่ดีพอทั้งคุณภาพและปริมาณ นอกจากนี้ความร้อนเหล็กกล้ารีดที่มีอยู่ที่มีจุดครากต่ำซึ่งน้อยกว่าเหล็กเกรด API X50-X60 (350-420 MPa YS) ยังคงมีความต้องการอยู่ต่อความสำเร็จของการพัฒนาเหล็ก

สาเหตุที่สำคัญสองประการสำหรับการใช้เหล็กกล้าใหม่ (New steel) ในอุตสาหกรรมยานยนต์ คือ ประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงและประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงส่วนใหญ่คือขนาดของน้ำหนักของชิ้นส่วนเหล็กซึ่งจะมีการควบคุมโดยการวัดและการออกแบบ ความปลอดภัยจะพิจารณาจากความสามารถในการดูดซับพลังงานของเหล็กที่ใช้ทำชิ้นส่วน ปัจจัยเหล่านี้ทั้งหมดเป็นแรงจูงใจให้ผู้ผลิตรถยนต์ของสหรัฐฯ ใช้ทั้ง High Formable และ Advanced High Strength Steels (AHSS) เพื่อทดแทนเหล็กกล้าธรรมดาที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในอดีต AHSS เป็นคำทั่วไปที่ใช้ในการอธิบายอนุกรมต่างๆ ของเหล็ก AHSS ที่พบมากที่สุดคือเหล็กสองเฟสที่ประกอบด้วยโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์ - มาร์เทนไซต์ (10) เหล็กเหล่านี้มีลักษณะความแข็งแรงสูงมีความเหนียวที่ดีมีอัตราส่วนความต้านทานต่อแรงดึงต่ำและมีความแข็งแรงสูง อีกชั้นหนึ่งของ AHSS คือเหล็กเฟสที่ซับซ้อนหรือเฟสหลายเฟสซึ่งมีโครงสร้างจุลภาคที่ซับซ้อนประกอบด้วยส่วนประกอบของเฟสต่างๆ และให้ผลผลิตสูงถึงอัตราส่วนแรงดึง เหล็กที่บีบที่เหนียวสำหรับการเปลี่ยนรูป (TRIP) เป็นอีกหนึ่งกลุ่มเหล็กกล้า AHSS ที่ได้รับความสนใจในหมู่ผู้ผลิตรถยนต์ของสหรัฐฯ เหล็กเหล่านี้ประกอบด้วยโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์ - เบนไนต์ที่มีระยะเวลา ออสเทนไนต์ (austenite) ที่สะสมไว้อย่างมากและแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงและการยืดตัวสูงสุดระหว่าง AHSS ในการใช้งาน ความสามารถในการดูดซับพลังงานในระดับสูงรวมกับ "ค่า n ที่ยั่งยืน" สูงถึงขีดจำกัดของการยืดตัวสม่ำเสมอตลอดจนความทนทานต่อการอบได้สูงทำให้เหล็กเหล่านี้มีความน่าสนใจเป็นพิเศษ สำหรับชิ้นส่วนและชิ้นส่วนที่จำเป็นต่อความปลอดภัยที่ต้องการการขึ้นภาพประกอบซับซ้อน เหล็กคลาส AHSS ที่ค่อนข้างใหม่คือเหล็กชุบแข็ง (Q & P) เหล็กเหล่านี้ดูเหมือนจะมีความเหนียวสูงกว่าเหล็กสองเฟสที่มีจุดแข็งที่คล้ายคลึงกันหรือความเหนียวแบบเดียวกับเหล็กกล้า TRIP ที่จุดแข็งที่สูงขึ้น ในที่สุดเหล็กกล้า martensitic ที่มีจุดแข็งที่สูงมากยังมีการใช้งานในบางส่วน ความริเริ่มล่าสุดของเหล็ก AHSS คือสิ่งที่เรียกว่า "AHSS รุ่นที่ 3" เหล็กเหล่านี้ได้รับการออกแบบมาเพื่อเติมเต็มพื้นที่ระหว่างเฟสสองเฟส / ทริปและเหล็กกล้า TWIP (Twin Induced Plasticity) ที่มีความเหนียวสูงมากที่ระดับความแรงเทียบเท่ากับ AHSS แบบเดิม เหล็กกล้า Q & P ที่ปรับปรุงแล้วอาจเป็นวิธีหนึ่งที่จะบรรลุเป้าหมายนี้ แนวคิดอื่นๆ ได้แก่ เหล็กเฟสคู่แบบ TRIP เหล็กกล้าแมงกานีสสูงและเหล็กกล้าไร้สนิม (CFB) ที่ไม่มีคาร์ไบด์ ในที่สุดเหล็กแข็งแข็งโพสท์ (PHS) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของยุทธศาสตร์ของยานพาหนะในอนาคต ในที่นี้จะมีการกล่าวถึงบางส่วนของอนุกรมด้านบนของเหล็กกลุ่มพรรณและเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูงที่มีการผสมด้วยอัลลอยด์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High Strength Low Alloy Steels: HSLA)

2.1.1 เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (HSLA)

หรือเหล็กไมโครอัลลอยด์ (microalloyed steel) ออกแบบมาเพื่อให้คุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและมีความต้านทานมากขึ้นทนต่อการกัดกร่อนในชั้นบรรยากาศมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนทั่วไป ซึ่งเหล็กกล้า HSLA จะไม่ถือว่าเป็นโลหะผสมเพราะถูกออกแบบมาเพื่อตอบสนองคุณสมบัติเชิงกลที่เฉพาะเจาะจง (เหล็กกล้า HSLA มีความแข็งแรงครากมากกว่า 275 MPa หรือ 40 ksi) องค์ประกอบทางเคมีของเหล็ก HSLA ที่เฉพาะเจาะจงอาจแตกต่างกันไปตามความหนาของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันเพื่อตอบสนองความต้องการสมบัติเชิงกลเหล็กกล้า HSLA ในรูปแบบแผ่นหรือแผ่นมีปริมาณคาร์บอนต่ำ (0.05-0.25 %C) เพื่อให้สามารถขึ้นรูปและมีความสามารถในการเชื่อมที่ดี ซึ่งเหล็กกล้า HSLA มีองค์ประกอบของแมงกานีสสูงถึง 2.0 % มีโครเมียมปริมาณเล็กน้อย นอกจากนี้ยังมีการนำธาตุต่างๆ ได้แก่ นิกเกิล (Ni) โมลิบดีนัม (Mo) ทองแดง (Cu) ไนโตรเจน (N) วานาเดียม (V) ไนโอเบียม (Nb)(11) ไทเทเนียม (Ti) และเซอร์โคเนียม (Zr) ถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสม(10)

ประเภทของเหล็กกล้า HSLA มีมากมายหลายเกรดหลายมาตรฐานและเป็นกรรมสิทธิ์ที่ออกแบบมาเพื่อให้พึงประสงค์เฉพาะการรวมกันของคุณสมบัติ เช่น ความแข็งแรง ความเหนียวขึ้นรูปการเชื่อม และความต้านทานการกัดกร่อนในชั้นบรรยากาศ เหล็กกล้า HSLA ไม่ได้ได้รับการพิจารณาเป็นโลหะผสม แม้ว่าคุณสมบัติที่ต้องการจะทำได้โดยใช้โลหะผสมขนาดเล็กเพิ่มเติม แต่เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (HSLA) จัดเป็นประเภทแยกต่างหากหมวดหมู่เหล็ก ซึ่งคล้ายกับเหล็กกล้าคาร์บอนรีดร้อนชนิดม้วน มีการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการเติมโลหะผสมขนาดเล็กและอาจใช้เทคนิคการผลิตพิเศษ เช่น วิธีการควบคุมการรีดและเร่งความเร็วในการเย็นตัว

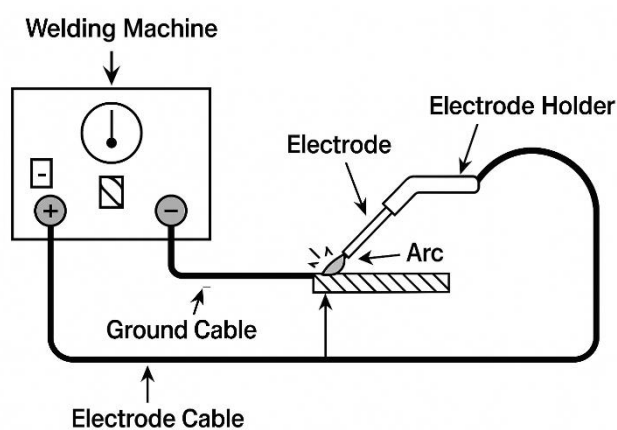
2.1.2 กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding Process: SMAW)

การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ หรือ การเชื่อมอาร์คโดยใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เป็นกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์คซึ่งจะหลอมเหลวโลหะเข้าด้วยกันโดยใช้ความร้อนที่เกิดจากการอาร์คไฟฟัระหว่างปลายของลวดเชื่อมกับผิวหน้าของชิ้นงาน

2.1.2.1 หลักการทำงานของกระบวนการเชื่อม SMAW

กระบวนการเชื่อม SMAW นิยมใช้กันมากในงานเชื่อมโลหะซึ่งจะใช้ความร้อนที่เกิดจากการอาร์คระหว่างปลายลวดเชื่อมกับชิ้นงานในการหลอมเหลวโลหะโดยที่วงจรไฟฟ้า

ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟ สายไฟ ตัวจับลวดเชื่อม จุดต่อชิ้นงาน ชิ้นงานและลวดเชื่อมโดยที่ปลายของสายไฟด้านหนึ่งกับชิ้นงานอีกด้านหนึ่งต่อกับหัวจับลวดเชื่อม ดังแสดงในภาพประกอบ 1

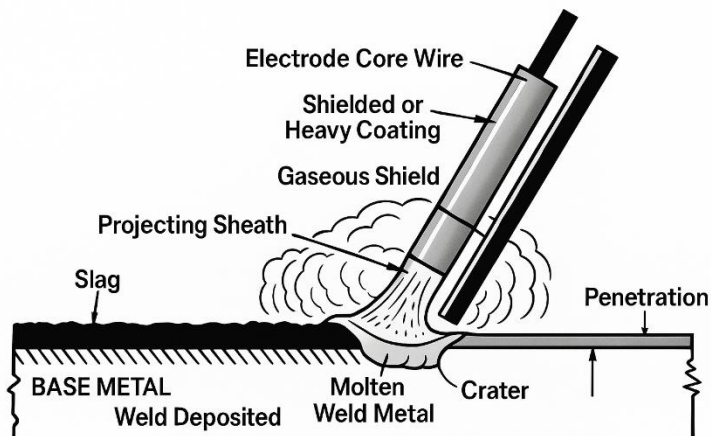


ภาพประกอบ 1 วงจรไฟฟ้าของกระบวนการเชื่อม SMAW

ที่มา: THERMAL MECHANICS. (n.d.: Online). Welding Cutting Automation.

ในขณะที่มีการอาร์คเกิดขึ้นจะมีความร้อนสูงเกิดขึ้นที่ปลายของลวดเชื่อมและผิวของชิ้นงานซึ่งโลหะเม็ดเล็กๆที่ปลายของลวดเชื่อมจะหลอมเหลวและไหลไปยังบ่อหลอมโลหะ (weld pool) ที่หลอมเหลวในชิ้นงานซึ่งอุณหภูมิที่สูงที่สุดของการอาร์คดังกล่าวมีค่าประมาณ 5000 °C นอกจากกระบวนการจะต้องการกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงเพียงพอที่จะทำการหลอมเหลวลวดเชื่อมและชิ้นงานเข้าด้วยกันแล้วยังต้องมีระยะห่างระหว่างปลายลวดเชื่อมกับบ่อหลอมโลหะที่เหมาะสมด้วย ซึ่งขนาดของลวดเชื่อมจะถูกกำหนดด้วยแรงดันไฟฟ้าสำหรับการอาร์ค โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 16-40 V และค่ากระแสไฟฟ้า 20-250 A ซึ่งอาจใช้กระแสตรง (DC) หรือกระแสสลับ (AC) ก็ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของลวดเชื่อมที่ใช้

การปกคลุมบริเวณที่เกิดการอาร์ค ดังแสดงในภาพประกอบ 2 กระบวนการนี้จะทำให้สารที่เคลือบผิวเปลี่ยนเป็นสถานะแก๊สโดยใช้ความร้อนที่เกิดจากการอาร์คและจะมีสแลก (Slag) เกิดขึ้นซึ่งจะขึ้นกับชนิดของลวดเชื่อมที่ใช้โดยถ้าหากมีการเคลือบผิวที่หนาจะใช้กระแสไฟฟ้ามักและมีอัตราการสิ้นเปลืองสูงกว่าแบบเคลือบผิวบางแต่จะให้อุณหภูมิในการอาร์คสูงกว่าแบบเคลือบผิวบาง



ภาพประกอบ 2 บริเวณที่เกิดกระบวนการเชื่อม SMAW

ที่มา: THERMAL MECHANICS. (n.d.: Online). Welding Cutting Automation.

2.1.3 ความร้อนป้อนเข้า (Heat Input)

ในกระบวนการเชื่อมทั้งหมดจะเกี่ยวข้องกับการได้รับความร้อนหรือแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นความร้อนที่ให้การเชื่อมจึงมีความสำคัญมากซึ่งจะเป็นตัวกำหนดการเย็นตัวของโลหะเชื่อม ความร้อนจากการอาร์คจะหลอมละลายโลหะงานและเนื้อเชื่อมส่วนบริเวณที่ติดกับเนื้อเชื่อม จะรับความร้อนสูงมากแต่ไม่หลอมละลายซึ่งบริเวณนี้เรียกว่า บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) และการเย็นตัวของงานเชื่อม มีอิทธิพลดังนี้(12)

(1) เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาต่อเนื้อเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ)

(2) เกิดความเค้นและความเครียดซึ่งนำไปสู่การแตกร้าวและการเสียรูปได้

เพื่อให้เข้าใจถึงผลที่อาจเกิดขึ้นกับโลหะในการเชื่อมจึงมีความจำเป็นที่จะต้องรู้ว่าควรให้ความร้อนเท่าไรกับกระบวนการเชื่อมโลหะนั้นๆ และเย็นตัวอย่างไร เช่น ในการเชื่อมไฟฟ้าใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อม 300 A แรงดันไฟฟ้าเชื่อม 25 V จะให้พลังงานความร้อนและแสงเท่ากับ $300 \times 25 = 7500 \text{ J/s (Watt)}$ อัตราพลังงานทั้งหมดที่เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนให้กับชิ้นงานเรียกว่า ค่าประสิทธิภาพทางความร้อน (Heat Efficiency)(13) ซึ่งจะเปลี่ยนไปตามกระบวนการเชื่อม ดังแสดงในตาราง 1 เป็นที่สังเกตว่าค่าประสิทธิภาพทางความร้อนที่ได้จากการทดลองในกระบวนการเชื่อมค่าที่ได้ขึ้นอยู่กับเทคนิคการเชื่อม (14)

ตาราง 1 ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของกระบวนการเชื่อม

กระบวนการเชื่อม	Heat Efficiency
เชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding)	90 - 99 %
เชื่อมมิก / แม็ก (Gas Metal Arc Welding)	65 - 85 %
เชื่อมฟลักซ์คอร์ (Flux Cored Arc Welding)	65 - 85 %
เชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding)	50 - 85 %
เชื่อมทิก (Gas Tungsten Arc Welding)	20 - 50 %

ที่มา: สมบูรณ์ เต็งหงส์เจริญ. (2531. 112). วิศวกรรมกรรมเชื่อม. สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ. กรุงเทพฯ.

ในการเชื่อมอาร์คไฟฟ้าทั้งหมด การอาร์คจะเคลื่อนที่ตามความยาวของชิ้นงานด้วยความเร็วสม่ำเสมอเพื่อให้ได้แนวเชื่อมสม่ำเสมอ ดังนั้นในการหาค่าความร้อนป้อนเข้า ดังสมการที่ 2.1

$$\text{Heat Input} = \frac{60VA}{1000v} (\text{Heat Efficiency}) \quad (2.1)$$

เมื่อ V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม (V)

A คือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม (A)

v คือ อัตราเร็วในการเชื่อม (mm/min)

Heat Efficiency คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนของกระบวนการเชื่อม ค่าอัตราความร้อนป้อนเข้ามีผลต่อขนาดของแนวเชื่อมและความกว้างบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) และอัตราการเย็นตัว โดยทั่วไปค่าความร้อนป้อนเข้าสูงจะให้แนวเชื่อมใหญ่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) มีบริเวณกว้าง (15)

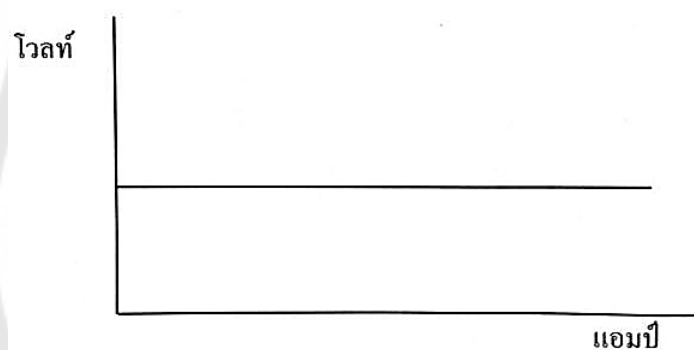
2.1.4 การเชื่อมไฟฟ้า (Arc welding)

เครื่องเชื่อมไฟฟ้ามีมากมายหลายแบบสามารถเลือกใช้ได้ตามต้องการได้แต่สิ่งที่สำคัญ คือ เครื่องเชื่อมต้องมีปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการหลอมละลายที่ดี โดยเครื่องเชื่อมมีระบบกระแสไฟฟ้าที่ต่างกัน 2 แบบ ดังนี้

2.1.4.1 กระแสไฟฟ้าเชื่อมคงที่ (Constant Current: CC) โดยทั่วไปใช้สำหรับการอาร์คด้วยมือ ได้แก่ การเชื่อมอาร์คด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ การเชื่อมทิก เป็นต้น

2.1.4.2 แรงดันไฟฟ้าเชื่อมคงที่ (Constant Voltage: CV) เหมาะสำหรับการเชื่อมอาร์คอัตโนมัติและกึ่งอัตโนมัติโดยเติมโลหะเชื่อมอย่างต่อเนื่อง

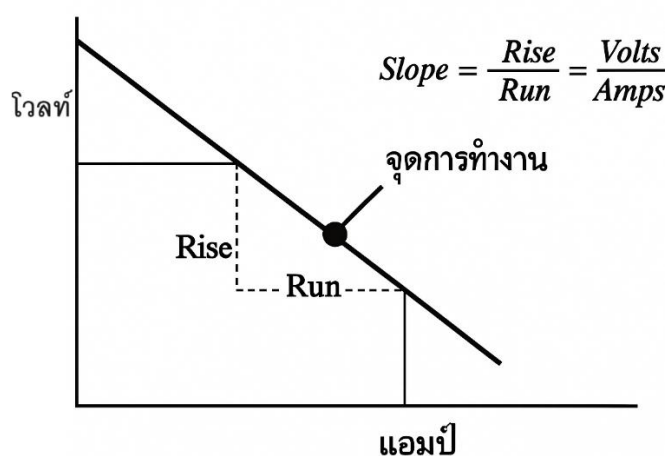
ความลาดชันของเส้นแสดงกำกับกำลังไฟเชื่อม Voltage/Ampere Curves-PowerSupply Slope โดยกำลังไฟเชื่อมสามารถแสดงได้ ดังแสดงภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 รูปร่างเส้น V/A ของหม้อแปลงหรือแบตเตอรี่

ที่มา: ญัฐพล ทองทวิง; สุรศักดิ์ ทองประเสริฐ; และ อนุพงศ์ สิงหราชชัย. (2561). การศึกษาอัตราการเติมเนื้อเชื่อมและประสิทธิภาพในการเติมเนื้อโลหะของลวดเชื่อมไฟฟ้า

ทฤษฎีการเชื่อม เส้นความลาด (Slope) เป็นตัวกำหนดตัวควบคุมแทนการใช้กระบวนการเชื่อม ส่วนมากนิยมใช้เส้นความลาด (Slope) บังคับให้แรงดันไฟเชื่อมตกที่อัตราการไหลของกระแสที่ 100 A เมื่อความลาดเท่ากับ 2 V/100 A เส้นความลาด (Slope) ได้จากความลาด V/A ความลาดทางตั้ง (Rise) หารด้วยความลาดทางราบ (Run) ได้ความลาดกำลังไฟฟ้าสำหรับการเชื่อม ดังแสดงในภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 นิยามเส้นความลาด (Slope)

ที่มา: ญัฐพล ทองทิวัง; สุรศักดิ์ ทองประเสริฐ; และ อนุพงศ์ สิงหราชัย. (2561). การศึกษาอัตราการเติมเนื้อเชื่อมและประสิทธิภาพในการเติมเนื้อโลหะของลวดเชื่อมไฟฟ้า

2.1.5 เครื่องเชื่อมไฟฟ้า (Welding Power Source)

เครื่องเชื่อมไฟฟ้า ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อการอาร์คระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงานทำให้เกิดความร้อนจนกระทั่งลวดเชื่อมหลอมละลายเติมในรอยต่อของชิ้นงาน เครื่องเชื่อมแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท คือ แบ่งตามแหล่งกำเนิดและตามกระบวนการเชื่อม

2.1.5.1 เครื่องเชื่อมแบบกระแสตรง (Direct Current: DC)

เครื่องเชื่อมแบบกระแสตรง (DC) หรือ เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบมอเตอร์เจนเนอเรเตอร์ (Motor Generator) เป็นเครื่องเชื่อมที่ผลิตกระแสตรงจ่ายให้แก่เครื่องเชื่อมชุดต้นกำลังของเครื่องเชื่อมมี 2 แบบ คือ ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับต่อจากสายเมนไฟฟ้า เพื่อขับให้มอเตอร์หมุนชุดเจนเนอเรเตอร์หรือไดนาโมซึ่งเกิดจากขดลวดหมุนตัดกับสนามแม่เหล็กทำให้กระแสไหลในขดลวดผลิตกระแสไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนอีกแบบจะเป็นแบบที่ใช้ภาคสนามหรือนอกสถานที่ที่ไม่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะขับด้วยเครื่องยนต์ (Engine Drive) แก๊สโซลีนหรือดีเซล

2.1.5.1.1 เครื่องเชื่อมแบบอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เป็นเครื่องเชื่อมที่ใช้ได้ทั้งกระแสไฟฟ้าตรงและกระแสไฟฟ้าสลับ เป็นที่นิยมในปัจจุบันความได้เปรียบของเครื่องเชื่อมแบบนี้คือ มีน้ำหนักเบา เชื่อมงานบางได้ เคลื่อนย้ายสะดวกสามารถหิ้วได้ด้วยมือ ต่อใช้กับเครื่องเชื่อม

ทิก (Tig) ได้ด้วยความถี่สูง (High Frequency) ที่มีอยู่ในเครื่อง ใช้กระแสไฟฟ้าน้อย ให้ประสิทธิภาพในการเชื่อมสูง อาร์คนิ่งและสม่ำเสมอสามารถเสียบกับเต้ารับภายในบ้านได้ หลักการทำงาน คือ ใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุม (Inverter Control) คลื่นความถี่จาก 50 Hz ให้สูงถึง 20 kHz ด้วยชุดควบคุมกำลังทรานซิสเตอร์ โดยมีชุดเรกติไฟเออร์เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสลับ (AC Input) เป็นไฟฟ้ากระแสตรงจากนั้นเปลี่ยนเป็นกระแสสลับความถี่สูงแล้วจึงเรียงกระแสใหม่อีกครั้ง ด้วยชุดเรกติไฟเออร์ ทำให้มีคลื่นความถี่สูงและคลื่นเรียบด้วยกระแสไฟฟ้าสลับ (DC Output) เพื่อใช้งาน

2.1.5.2 เครื่องเชื่อมแบบกระแสสลับ (Alternating Current: AC)

มีหลักการทำงานลักษณะเดียวกันกับหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) คือ หม้อแปลงจะทำหน้าที่เปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก 220 V หรือ 380 V ซึ่งเป็นแรงดันที่สาย (Line Voltage) ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมขณะเชื่อมอยู่ระหว่าง 20-40 V ลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด คือ ขดปฐมภูมิ (Primary) และขดทุติยภูมิ (Secondary) พันรอบแกนเหล็กซึ่งแกนเหล็กทำขึ้นจะแผ่นเหล็กผสมซิลิกอนบางๆอัดกันเป็นชั้นๆโดยมีฉนวน คือ วานิชหรือกระดาษกั้นระหว่างชั้น ขดลวดปฐมภูมิลวดที่พันจะเป็นเส้นเล็กจำนวนรอบสูง ปลายทั้งสองด้านต่อกันกับแรงดันที่สาย ส่วนขดลวดทุติยภูมิเส้นลวดที่พันจะโตกว่ามีจำนวนรอบน้อยกว่าสามารถปรับแต่งกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมได้ 4 วิธี ดังนี้

- (1) การเคลื่อนที่ขดลวด
- (2) การเคลื่อนที่ของแกนเหล็ก
- (3) เสียบขั้วขดลวดทุติยภูมิ
- (4) ปรับที่ปุ่มควบคุมด้วยไฟฟ้า

2.1.5.2.1 เครื่องเชื่อมแบบหม้อแปลงและเรียงกระแส (Transformer Rectifier) เป็นเครื่องเชื่อมที่สามารถใช้เชื่อมได้ทั้งกระแสไฟฟ้าตรงและกระแสไฟฟ้าสลับ โดยเครื่องเชื่อมแบบนี้จะรับกระแสไฟฟ้าสลับแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีชุดเรกติไฟเออร์ (Rectifier) ลักษณะการทำงานของชุดเรกติไฟเออร์เป็นการนำวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้ามาซ้อนกันเป็นชั้นๆกับโลหะที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านทางเดียวและป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับทางชั้นเหล่านี้จะให้กระแสสลับกับคลื่นบวกเพียงครึ่งคลื่นไหลผ่านได้ การไหลทางเดียวของที่สม่ำเสมอของคลื่นบวก ทำให้เกิดกระแสตรงไหลผ่านชุดเรกติไฟเออร์นำไปใช้งาน

ประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อม (Duty Cycle) หมายถึง ความสามารถของเครื่องเชื่อมในการเชื่อม โดยเทียบอัตราส่วนระหว่างเวลาที่เชื่อมต่อเวลาทั้งหมด ซึ่งเวลาทั้งหมดจะ

เทียบจาก 10 นาที เช่น เครื่องเชื่อมที่มีประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อม 60% หมายถึง เครื่องเชื่อมเครื่องนี้สามารถเชื่อมติดต่อกันนาน 6 นาที แล้วหยุดพัก 4 นาที แล้วจึงทำงานเชื่อมต่อสังเกตเห็นว่าเวลารวมทั้งหมดเท่ากับ 10 นาที นี่คือความสามารถของเครื่องเชื่อมเครื่องนี้ถ้าเชื่อมติดต่อกันเกิน 6 นาที โดยไม่หยุดพัก เครื่องเกิดความเสียหายได้แต่ถ้าเป็นเครื่องเชื่อมแบบอัตโนมัติความสามารถในการเชื่อมของเครื่องเชื่อมเป็น 100% คือ สามารถเชื่อมโดยไม่ต้องหยุดพักเชื่อมต่อเนื่องตลอดเวลาได้

โดยปกติเครื่องเชื่อมที่เป็นเครื่องเชื่อมแบบอัตโนมัติจะเป็นเครื่องเชื่อมชนิดแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant Voltage: CV) ได้แก่ เครื่องเชื่อมมิก (Mig) เครื่องเชื่อมทิก (Tig) เครื่องเชื่อมซับเมอร์ท (SAW) เครื่องเชื่อมฟลักซ์คอรเวย์ (Flux Cored Wire) เป็นต้น ส่วนเครื่องเชื่อมที่ไม่สามารถเชื่อมให้มีประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อมได้ 100% ได้แก่ เครื่องเชื่อมชนิดกระแสไฟฟ้าคงที่ (Constant Current: CC) เช่น เครื่องเชื่อมแบบธรรมดาหรือเครื่องเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) เครื่องเชื่อมคาร์บอนอาร์ค (Carbon Arc) เครื่องเชื่อมสตั๊ด (Stud)

2.1.6 ลวดเชื่อม (Welding Electrode)

2.1.6.1 มาตรฐานลวดเชื่อม (Standard of Electrode)

มาตรฐานของลวดเชื่อมที่ใช้งานแต่ละประเทศมีมาตรฐานที่ใช้งานแตกต่างกันไป เช่น ISO (International Standard Organization) เป็นมาตรฐานสากล AWS (American Welding Society) เป็นมาตรฐานสมาคมการเชื่อมประเทศสหรัฐอเมริกา JIS (Japanese Industrial Standard) เป็นมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่น DIN (Deutch Industries Norms) เป็นมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศเยอรมัน TIS (Thailand Industrial Standard) เป็นมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศไทย หรือที่เรียกว่า มอก. ซึ่งเทียบกับมาตรฐานของ AWS ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในประเทศไทย ลวดเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นลวดเชื่อมที่นิยมใช้กันมากโดยเฉพาะในงานโครงสร้างทั่วไปมาตรฐานสัญลักษณ์ของลวดเชื่อมไฟฟ้าตามมาตรฐานของสมาคมการเชื่อมประเทศสหรัฐอเมริกา (AWS A5.1) กำหนดตัวอักษรและตัวเลขไว้ดังนี้ซึ่งสามารถดูได้ที่ข้างกล่องลวดเชื่อมซึ่งจะเปรียบเทียบกับมาตรฐานของประเทศไทยและประเทศญี่ปุ่น

ข้อกำหนดรายละเอียดลวดสำหรับกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) ตามมาตรฐานของสมาคมการเชื่อมประเทศสหรัฐอเมริกา (AWS) ซึ่งได้แบ่งประเภทของลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS A5.1 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ตามข้อกำหนดรายละเอียดนี้จะแบ่งแยกตามประเภทของชนิดกระแสเชื่อม ชนิดของฟลักซ์หุ้ม ตำแหน่งท่าเชื่อม ดังแสดงในตาราง 2

ตาราง 2 รายละเอียดของลวดเชื่อมแต่ละประเภท (AWS A5.1)

ประเภทเชื่อม	ชนิดสารพอกหุ้ม	ตำแหน่งทำ เชื่อม	ชนิดกระแส
E6010	High cellulose sodium	F,V,OH,H	dcep
E6011	High cellulose potassium	F,V,OH,H	ac or dcep
E6012	High titania sodium	F,V,OH,H	ac or dcen
E6013	High titania potassium	F,V,OH,H	ac, dcep or dcen
E6019	Iron oxide titania potassium	F,V,OH,H	ac, dcep or dcen
E6020	High iron oxide	H-fillets F	ac or dcen ac, dcep or dcen
E6022 (a)	High iron oxide	F,H	ac or dcen
E7028 (b)	Low hydrogen potassium , iron powder	H-fillets,F	ac or dcep
E6027	High iron oxide , iron powder	H-fillets F	ac or dcen ac, dcep or dcen
E7014	Iron powder , titania	F,V,OH,H	ac, dcep or dcen
E7015 (b)	Low hydrogen sodium	F,V,OH,H	dcep
E7016 (b)	Low hydrogen potassium	F,V,OH,H	ac or dcep
E7018 (b)	Low hydrogen potassium , iron powder	F,V,OH,H	ac or dcep
E7018M	Low hydrogen potassium , iron powder	F,V,OH,H	dcep
E7024 (b)	Low hydrogen potassium , iron powder	H-fillets,F	ac, dcep or dcen
E7027	High iron oxide , iron powder	H-fillets F	ac or dcen ac, dcep or dcen
E7048 (b)	Low hydrogen potassium , iron powder	F,OH,H,V- down	ac or dcep

ที่มา: อนุรักษ์ ทองทวิง; สุรศักดิ์ ทองประเสริฐ; และ อนุพงศ์ สิงหราชัย. (2561). การศึกษาอัตราการเติมเนื้อเชื่อมและประสิทธิภาพในการเติมเนื้อโลหะของลวดเชื่อมไฟฟ้า

อักษรย่อแสดงตำแหน่งท่าเชื่อม ได้แก่ F=ท่าราบ H=ท่าระดับ H-Fillets=ฟิลเล็ตท่าระดับ V-Down=ท่าตั้งเชื่อมลง V=ท่าตั้งใช้สำหรับลวดเชื่อมขนาด 3/6 inch (4.8 mm) และต่ำกว่า

OH=ท่าเหนือศีรษะยกเว้นลวดเชื่อม 5/32 inch (4.0 mm) และต่ำกว่า สำหรับลวดเชื่อม E7014 E7016 E7018 E7018M

DCEP หรือ DCRP คือ กระแสไฟฟ้าตรงลวดเชื่อมขั้วบวก และ DCEN หรือ DCSP คือ กระแสไฟฟ้าตรงลวดเชื่อมขั้วลบ

(a) ลวดเชื่อม E6022 จุดประสงค์สำหรับการเชื่อมแนวเชื่อม เท่านั้น (Single Pass)

(b) ลวดเชื่อมที่ระบุการยึดตัว (Toughness) การดูความขึ้น การแพร่ซึมของไฮโดรเจน

2.1.6.2 หลักการอ่านสัญลักษณ์ลวดเชื่อม

ตามมาตรฐานสมาคมการเชื่อมประเทศสหรัฐอเมริกา (AWS) เป็นมาตรฐานในการเชื่อมที่ยอมรับกันทั่วโลก มีการกำหนดสัญลักษณ์ของลวดเชื่อมไว้ เช่น E6010 E6013 E7018 เป็นต้น ซึ่งมีหลักการอ่านสัญลักษณ์ ดังแสดงในภาพประกอบ 5

E หมายถึง ลวดเชื่อมไฟฟ้า

60 หมายถึง ค่าความแข็งแรงต่ำสุด ($60 \times 1000 = 60000$ psi)

1 หมายถึง ตำแหน่งท่าเชื่อมตัวเลขมีความหมายดังนี้

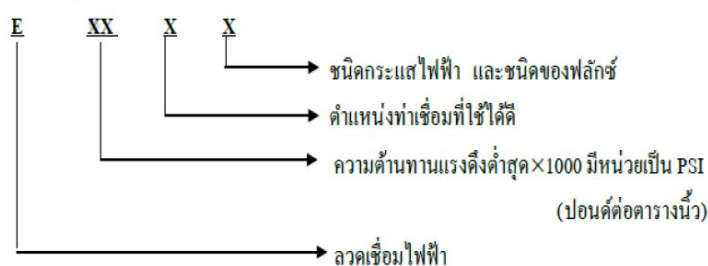
เลข 1 เชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม (All Position)

เลข 2 เชื่อมได้เฉพาะท่าราบและท่าระดับ (Flat and Horizontal Position)

เลข 3 เชื่อมได้เฉพาะท่าราบ (Flat Position)

3 หมายถึง ชนิดกระแสไฟฟ้าในตัวอย่าง หมายถึง

กระแสไฟฟ้าสลับ(AC) และ DCEP&DCEN (กระแสไฟฟ้าตรงขั้วบวกและขั้วลบ) ส่วนชนิดของฟลักซ์ ดังแสดงในตาราง 2



ภาพประกอบ 5 สัญลักษณ์ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS

ที่มา: ณัฐพล ทองทิวัง; สุรศักดิ์ ทองประเสริฐ; และ อนุพงษ์ สิงห์ราชชัย. (2561. 11). การศึกษาอัตราการเติมเนื้อเชื่อมและประสิทธิภาพในการเติมเนื้อโลหะของลวดเชื่อมไฟฟ้า

2.1.6.3 หลักการเลือกลวดเชื่อมให้เหมาะสมกับงาน

2.1.6.3.1 ส่วนผสมของโลหะงาน จะต้องรู้ว่าโลหะงานที่จะนำมาทำการเชื่อมมีส่วนผสมของธาตุใดเพื่อที่จะได้เลือกใช้ลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับงาน เช่น ถ้าชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าผสมต่ำก็ควรที่จะเลือกลวดเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำมาทำการเชื่อม

2.1.6.3.2 ลักษณะของรอยต่อและรอยเชื่อม ถ้าชิ้นงานไม่มีรอยต่อสามารถเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีการอาร์คแบบนิ่มนวลได้ การหลอมล็กน้อยไม่มีผลต่อชิ้นงาน ถ้าชิ้นงานที่มีความหนาต้องทำการบากชิ้นงานและควรเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีการหลอมล็กสูง

2.1.6.3.3 ความหนาและรูปร่างของชิ้นงานที่ซับซ้อน ควรเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีความเหนียวสูงเพื่อป้องกันการแตกร้าวในบริเวณรอยเชื่อม

2.1.6.3.4 สภาพการใช้งานและความต้องการชิ้นงานที่ถูกเชื่อม ควรพิจารณาว่าจะต้องรับแรงมากน้อยเพียงใดและต้องเลือกลวดเชื่อมให้มีสมบัติเหมือนกับชิ้นงาน โดยเฉพาะส่วนผสมทางเคมีความเหนียวและความต้านทานต่อแรงกระทำทางกล

2.1.6.3.5 ชนิดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ลวดเชื่อมบางชนิดเหมาะกับการเชื่อมด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (DC) บางชนิดเหมาะกับไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) การพิจารณาการใช้กระแสไฟฟ้าชนิดใดให้พิจารณาจากสัญลักษณ์ของลวดเชื่อม

2.1.6.3.6 กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม มีความสำคัญต่อการเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อม ถ้าใช้กระแสน้อยควรเลือกใช้ลวดเชื่อมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 mm ถ้าใช้กระแสไฟเชื่อมสูง 180 A ขึ้นไป ควรเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm ขึ้นไป

2.1.6.4 สารพอกหุ้มหรือฟลักซ์ (Flux)

2.1.6.4.1 เซลลูโลส (Cellulose) เป็นผลผลิตที่ได้จากเยื่อไม้หรือส่วนที่เหลือจากการผลิตกระดาษ เมื่อได้รับความร้อนจากการอาร์คจะทำให้เกิดแก๊สปกคลุมจำนวนมาก การอาร์คมีความรุนแรง ให้การหลอมลึกในแนวเชื่อมสูง สแลกมีน้อยและหลุดง่ายแต่มีสะเก็ดมาก ทำให้ผิวหน้าเชื่อมไม่ค่อยเรียบ ลวดเชื่อมในกลุ่มเซลลูโลส มี 2 ชนิด คือ เซลลูโลส-โซเดียม (EXX10) และเซลลูโลส-โพแทสเซียม (EXX11)

2.1.6.4.2 รูไทล์ (Rutile) เป็นสารพอกหุ้มชนิดไทเทเนียมออกไซด์ ช่วยทำให้สแลกไหลตัวได้ดีการอาร์ครุนแรงปานกลางให้การหลอมลึกปานกลาง ผิวหน้าของแนวเชื่อมจะเรียบ ลวดเชื่อมในกลุ่มรูไทล์มี 3 ชนิด คือ ไทเทเนีย-โซเดียม (EXX12) ไทเทเนีย-โพแทสเซียม (EXX13) และไทเทเนีย-ผงเหล็ก (EXXX4)

2.1.6.4.3 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) หรือลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำ เมื่อได้รับความร้อนจะให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีไฮโดรเจนต่ำปกคลุมเนื้อเชื่อม สแลกจะช่วยทำให้เนื้อเชื่อม มีออกซิเจนในระดับต่ำ ลวดเชื่อมกลุ่มนี้ควรรอบไล่ความชื้นก่อนนำไปเชื่อมขึ้นงาน เพื่อป้องกันรูพรุนหรือป้องกันการแตกร้าวของแนวเชื่อม ลวดเชื่อมในกลุ่มลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำ มี 3 ชนิด คือ ไฮโดรเจนต่ำ-โซเดียม (EXXX5) ไฮโดรเจนต่ำ-โพแทสเซียม (EXXX6) และไฮโดรเจนต่ำ-โพแทสเซียม-ผงเหล็ก (EXXX8)

2.1.6.4.4 เหล็กออกไซด์ เป็นฟลักซ์หุ้มที่มีผลทำให้เกิดการหลอมลึกต่ำ และมีความแข็งแรงต่ำด้วย ทำให้แนวเชื่อมเรียบสม่ำเสมอ ลวดเชื่อมในกลุ่มเหล็กออกไซด์ มี 2 ชนิด คือ เหล็กออกไซด์-โซเดียม (EXX20) และเหล็กออกไซด์-ผงเหล็ก (EXX27)

2.1.6.4.5 แมงกานีส (Manganese) เป็นส่วนผสมของสารพอกหุ้มที่ทำให้เหล็กออกไซด์มีจำนวนลดน้อยลงแมงกานีสออกไซด์จะทำหน้าที่ปรับปรุงสมบัติของสแลกให้การไหลตัวได้ดีขึ้น

2.1.6.4.6 ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide) เป็นส่วนผสมของสารพอกหุ้มที่ทำให้เกิด สแลกปกคลุมแนวเชื่อม ทำให้เกิดการอาร์กง่ายขึ้น มีการไหลตัวของสแลกที่ดี และทำให้ฟลักซ์หุ้มลวดเชื่อม มีความแข็ง

2.1.6.4.7 ธาตุผสม (Ferroalloys) ธาตุที่มักจะเติมลงไปในเรื่องเชื่อม ได้แก่ เฟอร์โร-แมงกานีส และเฟอร์โรซิลิคอน เป็นธาตุที่ใช้สำหรับกำจัดออกซิเจนที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถควบคุมความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมอีกด้วย

2.1.6.4.8 โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) หรือน้ำแก้วแก้วเป็นของเหลวสำหรับผสมต่างๆให้เกาะตัวกันเป็นฟลักซ์แล้วจึงนำไปพอกหุ้มแกนลวดเชื่อม

2.1.6.4.9 โลหะผสม (Alloys) คือ โลหะที่ถูกเติมผสมลงไปในเรื่องเชื่อม เช่น นิกเกิล (Ni) โมลิบดีนัม (Mo) และโครเมียม (Cr)

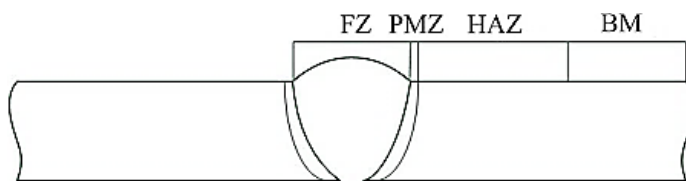
2.1.7 บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม

2.1.7.1 บริเวณแนวเชื่อม (Fusion Zone: FZ) คือ บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการใช้ความร้อนที่สูงโดยโลหะฐาน (Base Metal) บางส่วนหลอมเหลวเข้ามารวมตัวกับลวดเชื่อมหรือโลหะเติมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันและมีอัตราการเย็นตัวที่เร็วมีทิศทางการเติบโตของเกรนในทุกทิศทาง

2.1.7.2 บริเวณแนวหลอมละลายบางส่วน (Partially Melted Zone: PMZ) คือ ส่วนที่อยู่นอกแนวหลอมละลายโดยการหลอมละลายจะปรากฏขึ้นทันทีเมื่อเกิดการเชื่อมซึ่งสามารถเกิดการทางโลหะวิทยาเพื่อแยกโลหะออกจากแร่หรือโลหะผสม วัสดุจะต้องได้รับความร้อนจนกว่าโลหะตัวใดตัวหนึ่งจะเริ่มละลายและระบายออกจากตัวอื่นและสามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างการเชื่อม

2.1.7.3 บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) คือ บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่ไม่ละลายแต่มีการเปลี่ยนแปลงโดยการเชื่อมหรือการใช้งานที่ใช้ความร้อนจากกระบวนการเชื่อมและการปรับสภาพการเปลี่ยนแปลงขนาดภายหลังบนเนื้อโลหะฐานกับตัวเชื่อมรอยประสาน ซึ่งจะกินบริเวณกว้างหรือแคบขึ้นอยู่กับความร้อนที่ให้ในการเชื่อม (Heat Input)

2.1.7.4 บริเวณโลหะฐาน (Base Metal Zone: BM) คือ พื้นที่เหล็กเดิมหรือโลหะฐานจากการผลิตที่ผ่านกรรมวิธีเพิ่มสารอื่นๆเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กให้ดีและมีความแข็งแรงขึ้นโดยโลหะฐานนั้นจะไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้างของชิ้นงานจากเดิม



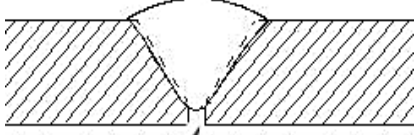
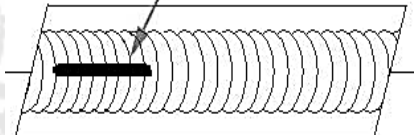
ภาพประกอบ 6 บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม

2.1.8 ความสามารถในการเชื่อม (Weldability)

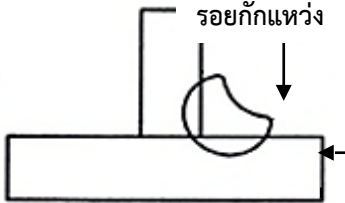
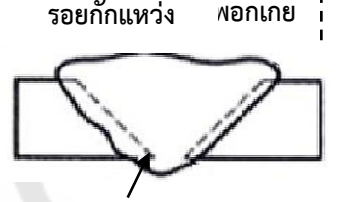
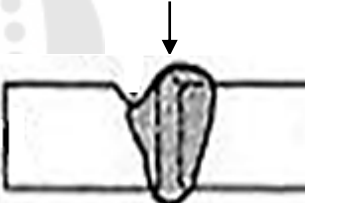

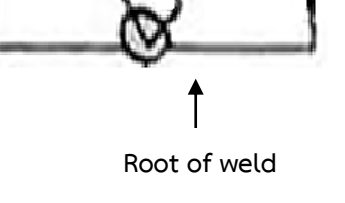

2.1.8.1 ปัญหาและข้อบกพร่องในงานเชื่อม

ปัญหาและข้อบกพร่องในงานเชื่อมเกิดจากวัสดุโลหะเชื่อม เทคนิคการเชื่อมเติมเนื้อโลหะ ขั้นตอนและกระบวนการเชื่อม โดยเกิดจากสภาวะหลอมละลายไม่สมบูรณ์ การพิจารณาคุณภาพของรอยเชื่อมนั้นมีหลายวิธี พิจารณาโดยมองเห็นด้วยตาและวิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลายชิ้นงานซึ่งเป็นวิธีการทั่วไป ดังแสดงในตาราง 3

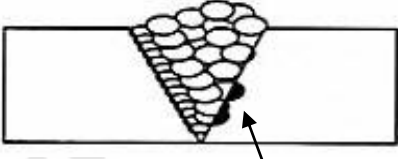
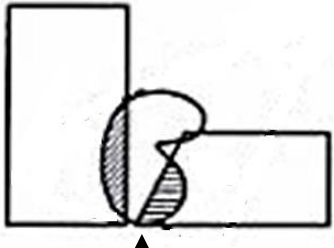
ตาราง 3 ปัญหาและข้อบกพร่องในรอยเชื่อม

ข้อบกพร่อง	สาเหตุ	วิธีการแก้ไข	ลักษณะที่ปรากฏ
	ความเร็วเดิน	อย่าให้สแลกหรือน้ำโลหะ	 <p>Inadequate or Lack of Penetration</p>
	ลวดเชื่อมไม่เหมาะสม	นำหน้าเปลวอาร์ค	
	กระแสไฟเชื่อม	เพิ่มกระแสไฟเชื่อมให้สูงขึ้น	
	ต่ำเกินไป	โดยไม่เสียการควบคุมสแลกขณะอาร์ค	
การซึมลึกไม่สมบูรณ์ (Incomplete Penetration)	มุมบากร่อง	บากขอบงานให้มุมกว้างขึ้น	 <p>Inadequate or Lack of Penetration</p>
	ขอบต่อชิ้นงานน้อยไป	หรือลดขนาดลวดเชื่อมลง ให้อาร์คสามารถเข้าถึงร่องต่อได้ดี	
	ระยะอาร์คห่างเกินไป	ควบคุมระยะอาร์คให้สม่ำเสมอ	
	เปลวอาร์คเบนหนีตำแหน่ง	ให้เปลวอาร์คตรงตำแหน่ง กลางร่องลดความเร็วในการเดินลวดเชื่อม	
	เชื่อมเดินลวดเชื่อมเร็วไป	การเดินลวดเชื่อม	

ตาราง 3 (ต่อ)

ข้อบกพร่อง	สาเหตุ	วิธีการแก้ไข	ลักษณะที่ปรากฏ
	มุมปากของแผ่นงานไม่รับการอาร์ก	ปรับเปลี่ยนมุมปากของแผ่นงาน	
	กระแสไฟเชื่อมแรงเกินไป	ลดกระแสไฟฟ้าและความเร็วเชื่อมลง	
	คุณสมบัติของลวดเชื่อมไม่ถูกต้อง	กำหนดลวดเชื่อมให้มีคุณสมบัติตรงต่อตามงาน	
รอยกักแห้ว (Undercut)	ระยะอาร์ค ห่างเกินไป สายลวดเชื่อมกว้างเกินไป	คุมอาร์คให้สั้น ใช้เทคนิคการสายลวดเชื่อมโดยสายและหยุดเชื่อมตรงขอบร่องต่อสองฝั่ง	
	ความเร็วเชื่อมมากเกินไป	ใช้ความเร็วเชื่อมให้พอดีกับการเติมเนื้อโลหะเชื่อมให้เหมาะสมกับร่องรอยต่อ	
	ขนาดลวดเชื่อมไม่เหมาะสม	เลือกขนาดลวดเชื่อมให้เหมาะสมกับร่องต่อ	
	ความเร็วเชื่อมไม่เพียงพอให้	ปรับเปลี่ยนความเร็วเหมาะสม	

ตาราง 3 (ต่อ)

ข้อบกพร่อง	สาเหตุ	วิธีการแก้ไข	ลักษณะที่ปรากฏ
หลอมขาด (Lack of Fusion)	สแลกหรือ วัตถุ แปลกปลอม	เซาะแนวเชื่อมเอาสแลก หรือวัตถุแปลกปลอมออก ตกแต่งแล้วเชื่อมใหม่ให้ เข้าไปรวมใน เนื้อโลหะ	
	เชื่อม ลวดเชื่อมโต	ใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็กลง เกินไป	
	กระแสไฟ เชื่อมต่ำ	เพิ่มกระแสไฟเชื่อมให้ สูงขึ้น	
	เกินไป		
	เตรียมรอยต่อ ไม่ดี	เตรียมรอยต่อให้ถูกต้อง และสะอาด	
	โลหะละลาย วุ้นนำหน้า เปลวอาร์ค มากไป	ปรับมุมเชื่อมให้ถูกต้อง	

ที่มา: ทิฆัมพร เชื้อผู้ดี; ปุณยिता ตระกูลผุดผ่อง; และ โยธิน หอมจุ. (2559. 22-24).
สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมเหล็กหล่อสีเทา ASTM A-48.(16)

2.1.8.1.1 การแตกร้าว

2.1.8.1.1.1 การแตกร้าวร้อน (Hot Crack)

สาเหตุการเกิดการแตกร้าวร้อน มีสองประการคือ ขณะที่โลหะเชื่อมกำลังแข็งตัวนั้น ส่วนที่แข็งตัวแล้วมีความยืดหยุ่นต่ำ และมีความแข็งแรงภายใน ไม่เพียงพอที่จะรับความเค้นที่เกิดจากการหดตัวของเนื้อโลหะขณะแข็งตัวได้รับความเค้น ซึ่งคือรูปแบบหนึ่งของพลังงาน เมื่อไม่สามารถต้านทานความเค้นนี้ได้ จึงปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรอยแตกร้าว อีกสาเหตุหนึ่งคือ มีโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำปะปนอยู่ในเนื้อเชื่อมขณะแข็งตัวโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำดังกล่าวจะแข็งตัวหลังจากที่โลหะรายรอบแข็งตัวแล้ว บริเวณที่ยังไม่แข็งตัวนี้มีความแข็งแรงต่ำ จึงไม่สามารถทนความเค้นที่เกิดจากการหดตัวได้ทำให้เกิดการแตกร้าวร้อนขึ้น ทั้งนี้ทั้งสองสาเหตุอาจเกิดขึ้นพร้อมกันทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการแตกร้าวร้อนมากขึ้น

2.1.8.1.1.2 การแตกเย็น (Cold Crack)

สาเหตุการเกิดการแตกร้าวเย็น คือ ธรรมชาติของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นต่ำ และการเกิดการแพร่ของไฮโดรเจนขณะเชื่อมเข้าไปในเนื้อเชื่อมและบริเวณกระแทกร้อน เมื่อไฮโดรเจนแพร่และรวมตัวกันมากเข้าทำให้เกิดความเค้นภายใน และก่อให้เกิดตำหนิหรือรอยแตกได้ในที่สุด ซึ่งกระบวนการแตกร้าวอาจเกิดขึ้นล่าช้าหลังจากการเชื่อมแล้วได้ถึง 48 ชั่วโมง ไฮโดรเจนที่แพร่เข้าไปในวัสดุนี้เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อม มีแหล่งที่มีจาก 2 แหล่งหลัก คือ ความชื้นในบรรยากาศรอบๆ แนวเชื่อม และความชื้นที่อยู่ในฟลักซ์ของลวดเชื่อม

2.1.8.1.2 ลักษณะการแตกร้าวที่ปรากฏทั่วไป

2.1.8.1.2.1 รอยแตกร้าวที่เกิดกับรอยเชื่อมปกติสาเหตุเกิดจากคุณภาพของลวดเชื่อม และสภาวะการเชื่อม และข้อบกพร่อง เช่น มีสแลก วัสดุเจือปน หรือเกิดฟองอากาศ

2.1.8.1.2.2 รอยแตกร้าวเกิดกับชิ้นงาน สาเหตุขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของโลหะงานเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน ทำให้เกิดความแข็งเปราะ และองค์ประกอบอื่น เช่น การเกิดคาร์ไบด์หรือการรวมตัวของคาร์บอนกับโลหะเชื่อม และการรวมกันของไฮโดรเจน

2.1.8.1.3 สาเหตุการแตกร้าวทั่วไป

2.1.8.1.3.1 การใช้ลวดเชื่อมผิดประเภท

2.1.8.1.3.2 สภาวะการเชื่อมไม่ถูกต้อง

2.1.8.1.3.3 การรวมตัวของไฮโดรเจนทำให้ออยเชื่อม

เปราะ

2.1.8.1.3.4 สาเหตุด้านอื่น ๆ เช่น ออกไซด์ฝังจมในรอย

เชื่อม แกรไฟต์ในเหล็กกล้ามีการขยายตัว

2.1.8.1.4 สาเหตุการแตกร้าวทางโลหะวิทยา

2.1.8.1.4.1 อัตราการเย็นตัวของโลหะเชื่อมจากจุด

หลอมละลาย

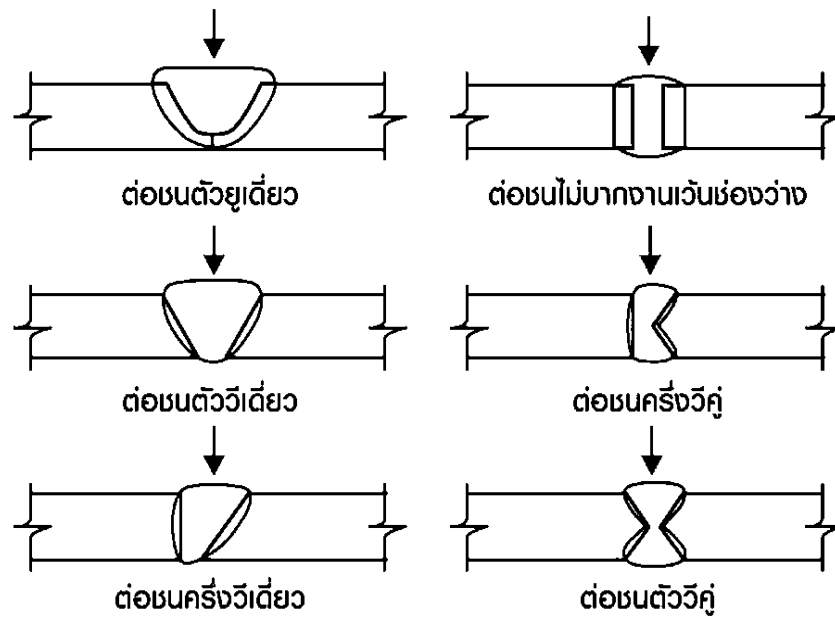
2.1.8.1.4.2 โครงสร้างภายในของรอยเชื่อมที่ถูก

เปลี่ยนแปลง

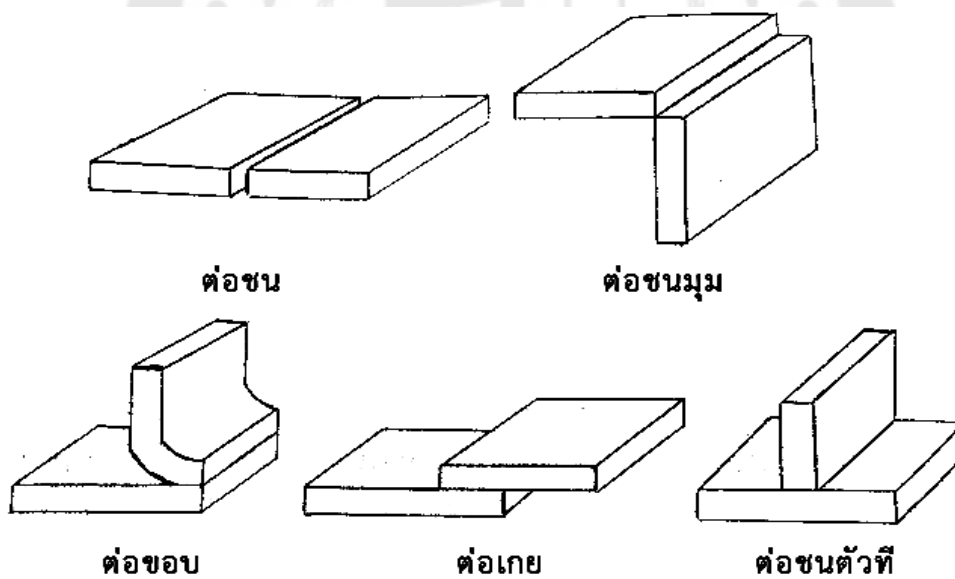
2.1.8.1.4.3 คุณสมบัติของโลหะเมื่อได้รับความร้อนสูง

2.1.9 การเตรียมรอยต่อของชิ้นงาน

รอยต่อของชิ้นงานนั้นมีความสำคัญอย่างมากในงานเชื่อม โดยจะต้องออกแบบให้ตรงกับประเภทของงานเพื่อให้งานเชื่อมมีประสิทธิภาพ รอยต่อนั้นจะมี 2 ประเภท ซึ่งจะใช้งานต่างกัน คือ รอยต่อแบบเปิดร่อง (Open - roots) จะมีช่องว่างของขอบชิ้นงานทั้งสอง เหตุที่ต้องเว้นเปิดร่องเพื่อให้การเชื่อมสามารถละลายกินลึกซึ้งไปถึงอีกด้านของชิ้นงานได้โดยไม่จำเป็นต้องเชื่อมอีกด้านหนึ่ง เพราะรอยต่อเชื่อมบางแนวต้องการความแข็งแรงสูงแต่ไม่สามารถเชื่อมอีกด้านหนึ่งได้ จึงจำเป็นต้องเชื่อมด้านเดียวเพื่อให้ได้ความสมบูรณ์สูงสุดจึงต้องทำการเปิดร่อง ดังแสดงในภาพประกอบ 2.7 อีกหนึ่งประเภท คือ รอยต่อแบบปิดร่อง (Closed - roots) จะต่อชนระหว่างขอบชิ้นงานโดยไม่มีกรเว้น ดังแสดงในภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 7 รอยต่อชนแบบเปิดร่อง (Open - roots)

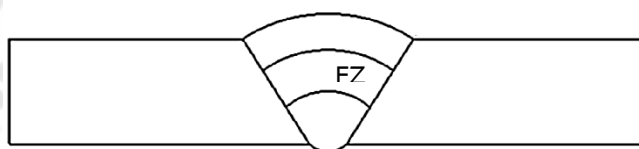


ภาพประกอบ 8 รอยต่อชนแบบปิดร่อง (Closed - roots)

ที่มา: อนุรักษ์พล ทองทวิง; สุรศักดิ์ ทองประเสริฐ; และ อนุพงศ์ สิงหราชัย. (2561). การศึกษาอัตราการเติมเนื้อเชื่อมและประสิทธิภาพในการเติมเนื้อโลหะของลวดเชื่อมไฟฟ้า

รอยต่อแต่ละแบบนี้จะต้องเลือกให้เหมาะสมกับงาน ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบรอยต่อให้เข้ากับขนาดของชิ้นงาน เพื่อให้งานเชื่อมมีคุณภาพที่ดี สำหรับโครงการนี้จะใช้รอยต่อแบบต่อชนตัววีเดี่ยวเท่านั้น

รอยต่อชนแบบตัววีเดี่ยว (Single V-groove) เหมาะกับงานที่มีความหนา มาก ๆ และต้องการความแข็งแรงในรอยเชื่อมสูง โดยทั่วไปรอยต่อแบบนี้ใช้กับงานที่มีความหนา 4 -15 mm โดยในการเชื่อมนั้นหากเชื่อมแบบด้านเดียวจะเหมาะกับงานที่ไม่ต้องรับภาระมาก แต่ถ้าต้องการให้แนวเชื่อมกินลึกมาก ๆ จะต้องเชื่อมทั้งสองด้านโดยเชื่อมด้านหนึ่งให้เสร็จก่อนแล้วจึงเซาะร่องด้านตรงข้ามและทำการเชื่อมให้เสร็จเรียบร้อย แต่หากจะทำการเชื่อมด้านเดียวให้กินลึกถึงด้านล่างอย่างสมบูรณ์จะต้องใช้แผ่นประกบหลังรองแนวเชื่อม โดยรอยต่อชนแบบร่องวีด้านเดียว ดังแสดงในภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 รอยต่อชนแบบตัววีเดี่ยว (Single V-groove)

2.1.10 การเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (HSLA steel welding)

เหล็กกล้า HSLA ใช้อย่างแพร่หลายในงานโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรง เช่น สะพาน ตึก เรือ หรือถังรับแรงดัน เป็นต้น เหล็กกล้า HSLA มีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักดีกว่าเหล็กกล้าผสมต่ำ (low alloy steel) ประมาณ 25% เส้นแบ่งระหว่างเหล็กกล้า HSLA กับเหล็กกล้าผสม (alloy steel) คือ ค่าความแข็งแรงคราก (yield strength) และความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate strength) ที่ประมาณ 275 MPa และ 490 MPa ตามลำดับ สาเหตุหนึ่งที่ทำให้เหล็กกล้า HSLA นี้ มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กกล้าผสม (alloy steel) คือ มีธาตุอื่นๆ นอกเหนือจากคาร์บอน (C) เจืออยู่ เช่น คอปเปอร์ (Cu) นิกเกิล (Ni) โครเมียม (Cr) ไทเทเนียม (Ti) แมงกานีส (Mn) วานาเดียม (V) โบรอน (B) และไนโอเบียม (Nb) เป็นต้น(17)

การเชื่อมเหล็กกล้า HSLA ให้ได้คุณภาพดี คือ มีคุณสมบัติทางกลดี มีคุณสมบัติทางเคมีของเนื้อเชื่อมดีและปราศจากนั้น ทำได้ยากกว่าการเชื่อมเหล็กกล้าเนื่องจากลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุนี้คือ มีความยืดหยุ่นต่ำ มีความเสี่ยงต่อการแพร่ของไฮโดรเจน และการเกิดความแข็งแรงเฉพาะจุดที่มากกว่าปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีธาตุอื่นๆ เจืออยู่นั่นเอง

การที่มีธาตุอื่นๆ เจืออยู่นี้ทำให้บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ของบริเวณที่เชื่อมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและมีความยืดหยุ่นลดลงมากกว่าปกติเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น ทำให้มีความเสี่ยงต่อการแตกร้าว

การเกิดการแตกร้าวเกี่ยวเนื่องกับการเชื่อมโลหะชนิดนี้มีสองประเภทคือ การแตกร้าวร้อน (Hot crack) และการแตกร้าวเย็น (Cold crack) การแตกร้าวร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิของวัสดุในการเชื่อมที่มากกว่า 200 °C ในขณะที่การแตกร้าวเย็นเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C

ในการเชื่อมเหล็กกล้า HSLA นั้นจะต้องเข้าใจในโครงสร้างและส่วนประกอบธาตุทางเคมีในเหล็ก หากออกแบบกระบวนการเชื่อมไม่ดีอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่งานเชื่อม ซึ่งปัญหาที่พบโดยทั่วไป คือ การแตกร้าวของรอยเชื่อมและการเกิดสแลก จึงต้องพิจารณาการเตรียมชิ้นงานก่อนเชื่อมดังนี้

2.1.10.1 ต้องแน่ใจว่าโลหะที่จะทำการเชื่อมเป็นโลหะชนิดใด โดยอาจทำการพิจารณาโดยการทดสอบองค์ประกอบธาตุทางเคมี

2.1.10.2 ทำความสะอาดสะอาดสิ่งสกปรกหรือคราบน้ำมันต่างๆ ที่อาจติดอยู่บนโลหะออก

2.1.10.3 วางแผนการเชื่อม

2.1.10.3.1 เลือกวิธีการเชื่อม ซึ่งจะใช้วิธีการเชื่อมแบบแก๊สหรือไฟฟ้าแล้วแต่ความเหมาะสม

2.1.10.3.2 ลวดเชื่อมที่ใช้จะต้องใช้ลวดเชื่อมสำหรับเหล็กกล้า HSLA

2.1.10.3.3 เตรียมร่องหรือรอยต่อ ซึ่งในการเตรียมร่องหรือรอยต่อนี้จะสามารถทำได้หลากหลายวิธีแต่วิธีที่นิยมที่สุดคือการบากหรือเซาะร่อง เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ความรวดเร็ว

2.1.11 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition Analysis)

ในการตรวจสอบวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีจะใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ แสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope: SEM) มีการประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย โดยส่วนสำคัญคือ ส่วนฮาร์ดแวร์ของกล้อง ได้แก่ อุปกรณ์ตรวจจับ (detector) แบบต่างๆ ที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อตรวจจับ สัญญาณรูปแบบแตกต่างกัน ซึ่งหนึ่งในนั้นคือ อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเอกซ์เรย์ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer: EDS) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกแยะสัญญาณเอกซ์เรย์ลักษณะเฉพาะ (characteristic X-rays) ของธาตุที่แตกต่างกันด้วยสเปกตรัมเชิงพลังงานควบคู่กับการใช้ซอฟต์แวร์ประมวลผลสัญญาณที่ได้ทำให้หาธาตุที่เป็น

ส่วนผสมของชิ้นงานได้ สเปกตรัม EDS จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสัญญาณเอกซ์เรย์ที่ตรวจจับได้ (X-ray counts) ทางแกน Y กับ พลังงาน (energy) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในหน่วย keV ทางแกน X พีคที่ที่เกิดขึ้นในสเปกตรัมจะสอดคล้องกับธาตุที่เป็นองค์ประกอบของพื้นที่ที่เล็ก ๆ

นอกจากเทคนิค EDS จะสามารถวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพ (qualitative element analysis) แล้วยังสามารถวิเคราะห์ธาตุเชิงกึ่งปริมาณ (Semi-quantitative element analysis) ได้อีกด้วย แต่ความแม่นยำจะขึ้น อยู่กับวิธีการและชิ้นงานมาตรฐานที่ใช้ ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภาพเข้ามาพร้อมกับอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเอกซ์เรย์เกิดเป็นสัญญาณภาพที่แสดงให้เห็นการกระจายของธาตุต่างๆ ที่เทคนิค EDS สามารถตรวจพบ เช่น แสดงพื้นที่ที่กำหนด (X-ray element mapping) บนพื้นผิวชิ้นงาน แสดงในแบบการสแกนเชิงเส้นตรง (X-ray line scan technique) ซึ่งจะวิเคราะห์สัญญาณตามแนวเส้นตรงที่ผู้ใช้เลือกบนผิวชิ้นงาน

2.1.12 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)(18)

ความแข็ง คือ การต้านทานต่อการเสียรูปของวัสดุ หรือ ความต้านทานต่อการกระทำต่อวัสดุ เมื่อวัสดุสูญเสียความต้านทาน ก็จะก่อให้เกิด ความเสียหาย (Damaged) รอยบุ๋ม (Dent) ความเสื่อมหรือความทรุดโทรมอื่น ๆ ซึ่งเป็นผลที่ได้จากแรง หรือความกดดันที่กระทำต่อวัสดุนั้น ในความต้องการที่จะรู้ค่าความแข็งของวัสดุ จำเป็นต้องหาเครื่องมือมาวัด เครื่องมือนี้จะสร้างรอยกดบุ๋มเป็นจุด บนพื้นผิว ด้วยแรงกดที่กระทำบนพื้นผิววัสดุที่ต้องการทราบความแข็ง ดังนั้นการทดสอบความแข็งจึงสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในเชิงโลหะวิทยา การวัดความแข็งจะเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นงานทดสอบ โดยมีวิธีที่นิยมใช้งานดังนี้

(1) Brinell Hardness Test เป็นการวัดความแข็งโดยอาศัยแรงกดคงที่กระทำกับลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว โดยพื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นผิวโค้ง

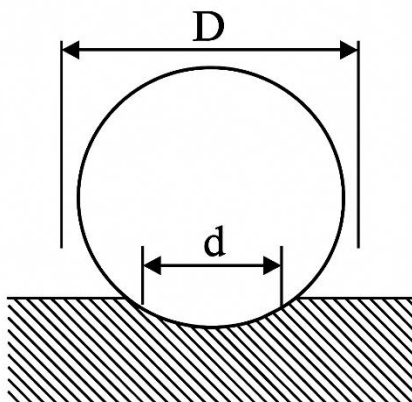
(2) Vickers Hardness Test เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว เช่นเดียวกับการทดสอบแบบ Brinell Hardness Test

(3) Rockwell Hardness Test เป็นวิธีวัดความแข็งของโลหะที่นิยมใช้มากที่สุด โดยจะวัดความแข็งจากความลึกกระยะกึ่งที่ถูกหัวกดกดด้วยแรงคงที่ มีวิธีการวัดหลายสเกลเพื่อให้สามารถเลือกใช้วัดความแข็งที่เหมาะสมมากที่สุด

สำหรับโครงการนี้มีการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test) เพียงวิธีเดียวเท่านั้น จึงขอกล่าวถึงข้อมูลพื้นฐานของการทดสอบเพื่อให้เกิดความเข้าใจในหลักการทดสอบดังนี้

การทำการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ให้นำชิ้นงานทดสอบวางบนแท่นวางชิ้นงานทดสอบ ทดสอบด้วยกระดบแท่นวางขึ้นจนชิ้นงานทดสอบสัมผัสกับหัวกด การทดสอบตามมาตรฐานการวัดขนาดของรอยกดจะใช้เครื่องวัดไมโครมิเตอร์ผ่านกล้องจุลทรรศน์ซึ่งจะมีมาตรวัดโปร่งแสงปรากฏอยู่บนภาพรอยกด การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์เป็นการทดสอบความแข็งที่ดี แต่มีข้อจำกัดคือไม่สามารถใช้กับวัสดุที่มีความแข็งมาก เนื่องจากหัวกดลูกบอลจะเกิดการเสียรูปมากเกินไป รวมทั้งการทดสอบกับชิ้นงานที่บางมาก เนื่องจากรอยกดที่เกิดขึ้นอาจเกินความหนาชิ้นงานทดสอบและไม่เหมาะกับการทดสอบวัสดุที่ผ่านการชุบผิวแข็ง เนื่องจากรอยกดจะลึกเกินความหนาของชั้นชุบแข็ง ทำให้ได้ค่าความแข็งของแกนกลางทดสอบซึ่งอ่อนนิ่มร่วมด้วย ส่งผลให้ค่าความแข็งผิวชุบผิดพลาด

ค่าความแข็งบริเนลล์ปกติวัดเป็นแรงดันต่อหน่วยพื้นที่ในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตรของรอยกดที่เกิดขึ้นหลังนำน้ำหนักกดออก โดยการหาแรงที่กระทำด้วยพื้นที่รอยกด ในรูปของพื้นที่ทรงกลม ดังแสดงในภาพประกอบ 2.10 โดยสามารถหาค่าความแข็งได้ ดังสมการที่ 2.2



ภาพประกอบ 10 หัวกดและรอยกดในการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

$$BHN = \frac{2L}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.2)$$

เมื่อ BHN คือ ค่าความแข็งบริเนลล์ (kg/mm^2)

- L คือ น้ำหนักกดที่กระทำ (kg)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด (mm)
 d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด (mm)

2.1.13 การทดสอบความแข็งแรง (Tensile Test)

การทดสอบด้วยการดึงเป็นการทดสอบเพื่อหาสมบัติของวัสดุ การทดสอบนี้ช่วยให้ได้ค่าสมบัติด้านความยืดหยุ่น ความแข็งแรงคราก (Yield strength) หรือจุดที่วัสดุรับแรงได้สูงสุดโดยไม่เสียรูป ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate strength) หรือจุดที่วัสดุรับแรงสูงสุดและอัตราส่วนการหดตัวสัมพัทธ์ของหน้าตัด (Poisson ratio) ซึ่งเหล่านี้เป็นสมบัติที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของวัสดุ นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหาการยืดตัวเมื่อแตกหักของวัสดุได้อีกด้วย การทดสอบด้วยการดึงโดยทั่วไปเป็นการให้แรงในแนวแกนเดียว (Uniaxial tensile test) แก่ชิ้นงานทดสอบ โดยแรงดึงนี้จะกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบ หากนำขนาดของแรงดังกล่าวหารด้วยพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงก็จะได้ค่าที่เรียกว่า ความเค้น (Stress: σ) ในขณะที่รับแรงดึงวัสดุจะเกิดการเสียรูปโดยยืดตัวออก สัดส่วนระหว่างระยะยืดตัวต่อความยาวเดิมของชิ้นงานทดสอบ เรียกว่า ความเครียด (Strain: ϵ) ความเค้นและความเครียดเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ตามลำดับตามสมการที่ 2.3 และ 2.4

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.4)$$

เมื่อ F คือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับหน้าตัด A

ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนไปจากความยาวเดิม L_0

ในการพิจารณาความเค้นทำได้ 2 แบบ คือ (1) ความเค้นแบบวิศวกรรม (Engineering stress) เป็นการพิจารณาความเค้นบนพื้นฐานพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานคงที่ และ

(2) ความเค้นจริง (True stress) เป็นการพิจารณาความเค้นบนพื้นฐานพื้นที่หน้าตัดจริงที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่นั้น ดังนั้นความเค้นจริงมีค่าสูงกว่าความเค้นแบบวิศวกรรม

การหาความแข็งแรงหรือความแข็งแรงของวัสดุโดยการดึงนั้นกระทำได้โดยค่อยๆ เพิ่มแรงดึงที่กระทำต่อวัสดุทีละน้อยจนกระทั่งวัสดุเกิดการแตกหัก ในระหว่างที่ออกแรงดึงวัสดุจะค่อยๆ ยืดตัวออก ส่งผลให้ขนาดหน้าตัดของวัสดุเล็กลงเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่สามารถต้านทานแรงดึงที่เพิ่มขึ้นต่อไปได้ วัสดุจึงขาดออกจากกัน ในทางปฏิบัตินิยมนำความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงที่ให้ (ในรูปความเค้น) กับระยะยืดตัว (ในรูปความเครียด) มาแสดงผลเทียบต่อกันในรูปกราฟ ซึ่งนิยมเรียกว่า เส้นโค้งความเค้น - ความเครียด (Stress-Strain Curve)

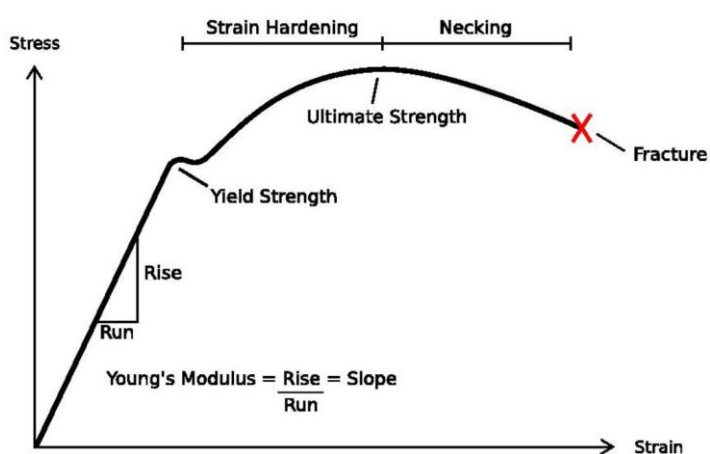
2.1.13.1 การเขียนกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve)

กราฟความเค้น-ความเครียดของวัสดุแต่ละชนิด เป็นสิ่งที่แสดงสมบัติของวัสดุชนิดนั้นอย่างชัดเจนว่ามีพฤติกรรมรับแรงและเสียรูปอย่างไร วัสดุต่างชนิดกันจึงมีรูปแบบของกราฟที่ต่างกัน ค่าสมบัติสำคัญของวัสดุสามารถอ่านได้จากกราฟดังกล่าวนี้ เช่น ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนรับได้ (ความแข็งแรงดึงสูงสุด) ค่าความเค้นสูงสุดที่ทำให้วัสดุยังอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น (ความแข็งแรงคราก) ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น เป็นต้น โดยทั่วไปกราฟความเค้น-ความเครียด ได้จากการทดสอบแรงดึง ลักษณะของพฤติกรรมที่ได้สำหรับวัสดุเหนียวทั่วไป ดังแสดงในภาพประกอบ 11

จากภาพประกอบ 11 เป็นที่สังเกตได้ว่าเป็นการดึงขึ้นทดสอบอย่างช้าๆ ขึ้นทดสอบจะค่อยๆ ยืดตัวออกจนถึงจุด A ในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ จึงได้กราฟเป็นเส้นตรง เรียกจุด A ว่าพิสัยสัดส่วน (Proportional limit) และภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบยืดหยุ่น นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำขึ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิสัยสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด B ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก เรียกว่า จุดคราก (Yield point) และค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield stress) หรือความแข็งแรงคราก (Yield strength) เป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับการคงรูปของวัสดุ ค่าความแข็งแรงครากนี้มีประโยชน์กับวิศวกรรมมาก เพราะใช้กำหนดขีดจำกัดค่าความเค้นสูงสุดที่จะเกิดขึ้นบนโครงสร้างหรือชิ้นงาน โดยที่ยังไม่เกิดการเสียหาย โดยค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานต้องไม่เกินกว่าค่าความเค้นจุดครากนี้เพื่อเป็นการป้องกันการเสียหาย ซึ่งนำไปสู่ค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัย (Factor of Safety: FOS) ของชิ้นงาน ดังสมการที่ 2.5

$$FOS = \frac{\text{ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน}}{\text{ค่าความเค้นครากของวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงาน}} \quad (2.5)$$

หลังจากจุดครากไปแล้ววัสดุจะเปลี่ยนรูปถาวรโดยความเค้นจะเพิ่มอย่างช้าๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด C) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate strength) หรือความเค้นแรงดึง (Tensile strength) เป็นความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้ก่อนที่จะเริ่มขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) จุดสุดท้าย (จุด D) ของกราฟเป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน



ภาพประกอบ 11 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve)

ที่มา: ทิชัมพร เชื้อผู้ดี; ปุณยิศา ตระกูลผุดผ่อง; และ โยธิน หอมจุ. (2559. 22-24). สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมเหล็กหล่อสีเทา ASTM A-48.

2.1.14 การทดสอบการกระแทก (Impact Test)

การทดสอบการกระแทกเป็นการวัดการส่งถ่ายพลังงานที่จำเป็นในการแตกหักของวัสดุค่าความแข็งแรงการกระแทกจะบ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรงแบบฉับพลัน (shock load) แม้พลังงานไม่สามารถสร้างและทำลาย แต่พลังงานการกระแทกจะสูญเสียไปในหลายลักษณะ เช่น ถูกใช้ในการเสียรูปแบบยืดหยุ่นและแบบถาวรของวัสดุ และแรงเสียดทานจากการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่างๆ เป็นต้น โดยการออกแบบโครงสร้างและเครื่องจักร ประการแรกต้องให้ชิ้นงานสามารถดูดซับพลังงานให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ในช่วงของการยืดหยุ่น และประการที่สองคืออาศัยการหน่วงบางรูปแบบเพื่อลดการดูดซับพลังงานของเครื่อง ในการทดสอบ

การกระแทกจะใช้พลังงานของลูกตุ้มกระแทกให้ขึ้นงานทดสอบแตกหักโดยพลังงานจะนิยามเป็นงานซึ่งเป็นแรงที่กระทำเป็นระยะทางหนึ่ง ดังสมการที่ 2.6

$$W = FD \quad (2.6)$$

เมื่อ W คือ งาน (N·m)

F คือ แรงที่กระทำ (N)

D คือ ระยะทางในช่วงที่แรงกระทำ (m)

วัตถุประสงค์การทดสอบการกระแทก คือ การวัดงานที่ใช้ในการแตกหักภายใต้การกระแทกอย่างฉับพลัน ซึ่งสามารถหาได้จากการปล่อยลูกตุ้มที่ทราบค่าน้ำหนักแน่นอนลงบนขึ้นทดสอบด้วยความสูงค่าหนึ่ง ดังแสดงในภาพประกอบ 12 แล้วทำการคำนวณค่าการดูดซับพลังงานการกระแทก (Absorb energy) หรือความต้านทานการกระแทกของวัสดุจากผลต่างของระดับพลังงานศักย์ของลูกตุ้มก่อนและหลังการกระแทก ดังสมการที่ 2.7

$$E = mg(h - h') \quad (2.7)$$

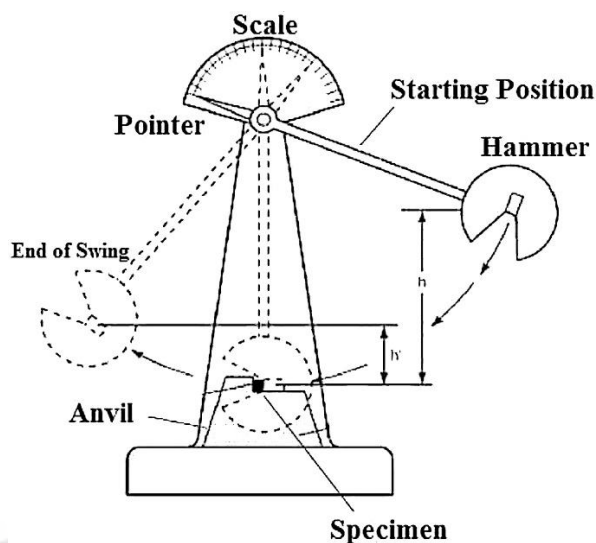
เมื่อ E คือ พลังงานที่ได้จากการปล่อยตุ้มน้ำหนัก (N·m)

m คือ มวลของตุ้มน้ำหนัก (kg)

g คือ อัตราเร่งจากแรงดึงดูดของโลก (9.81 m/s^2)

h คือ ความสูงของลูกตุ้มก่อนกระแทก (m)

h' คือ ความสูงของลูกตุ้มหลังกระแทก (m)



ภาพประกอบ 12 ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบการกระแทก

ที่มา: ทิชัมพร เชื้อผู้ดี; ปุณนิศา ตระกูลผุดผ่อง; และ โยธิน หอมจุง. (2559. 22-24). สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมเหล็กหล่อสีเทา ASTM A-48.

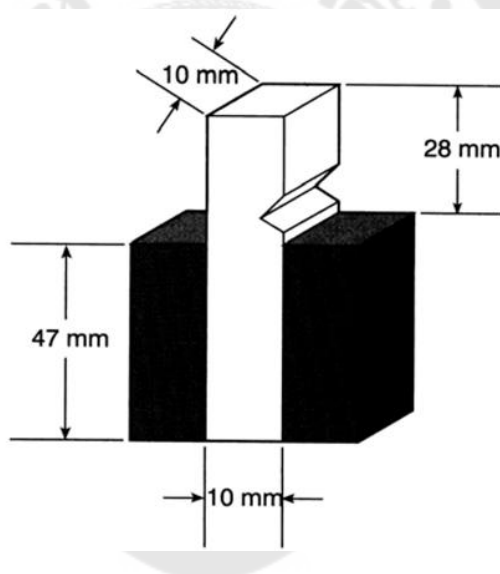
สมบัติของวัสดุที่สัมพันธ์กับการแตกหักเรียกว่าความแกร่ง (toughness) โดยสาเหตุของการแตกหักมาจากการกระแทกหรือแรงกระทำแบบฉับพลัน โดยความเหนียวและความแข็งแรงจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อความแกร่งของวัสดุ และโดยทั่วไปจะใช้การทดสอบการกระแทกในการวัดความแกร่งของวัสดุ

แรงที่กระทำในการทดสอบการกระแทกสามารถทำได้ทั้งในรูปของการดึง การอัด การดัด หรือการบิด แต่ที่นิยมใช้คือ แรงดัดงอและที่นิยมใช้น้อยที่สุดคือ แรงดึง ส่วนแรงอัดและแรงบิดจะใช้เฉพาะกรณีเท่านั้น การตีกระแทกสามารถทำได้ด้วยการปล่อยลูกตุ้มน้ำหนักการเหวี่ยงลูกตุ้มหรือการหมุนวงล้อ บางการทดสอบจะเป็นการทดสอบการแตกหักของชิ้น ทดสอบด้วยการกระแทกเพียงครั้งเดียวและบาง การทดสอบเป็นการแตกหักชิ้นทดสอบด้วยการกระแทกหลายครั้งด้วยน้ำหนักเดิม โดยเพิ่มความสูงลูกตุ้มขึ้นเรื่อยๆจนชิ้นงานแตกหัก

อย่างไรก็ตามการทดสอบที่นิยมใช้โดยทั่วไป ได้แก่ การทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact test) และแบบไอซอด (Izod impact test) โดยการทดสอบทั้งคู่นี้จะทำการใส่แรงกระทำด้วยการเหวี่ยงลูกตุ้มและใช้ชิ้นทดสอบที่มีร่องบากและมีขนาดเล็ก และการทดสอบจะเป็นการใส่แรงด้วยการดัดงอ การทดสอบทั้งสองแบบนี้ต่างกันที่การออกแบบชิ้นทดสอบและความเร็วของลูกตุ้มในการกระแทกชิ้นทดสอบ ในการทดสอบแบบชาร์ปีชิ้นทดสอบจะถูกยึดใน

ลักษณะเป็นคานเดี่ยว (single beam) แล้วตีกระแทกที่บริเวณด้านหลังของร่องบาก ส่วนในการทดสอบแบบไอซอดจะยึดชิ้นงานในรูปของคานโยก และตีกระแทกที่ปลายอีกข้างหนึ่งด้านหน้าร่องบาก ในการทดสอบเหล่านี้การดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้น

ชิ้นงานทดสอบในการทดสอบแบบไอซอด ดังแสดงในภาพประกอบ 13 จะถูกยึดปลายข้างหนึ่งในแนวตั้งด้วยหัวจับที่ติดอยู่กับฐาน ในขณะที่การทดสอบแบบชาร์ปีชิ้นงานจะถูกยึดปลายทั้งสองข้างและอยู่ในแนวนอน ดังแสดงในภาพประกอบ 2.14 โดยใช้ความเร็วลูกตุ้มในการกระแทก 17.5 ft/s การบากชิ้นทดสอบทั้งสองแบบเป็นการเพิ่มแรงเค้นเฉพาะบริเวณ ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดซับของพลังงานที่จุดเดียวและทราบบริเวณที่ชิ้นงานจะเกิดการแตกหัก ถ้าไม่มีการบากแรงเค้นจะกระจายไปทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปถาวรจากการดัดอมากกว่าที่เกิดการแตกหัก ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุประสงค์การทดสอบการกระแทกเป็นการวัดปริมาณพลังงานที่ต้องการในการแตกหักของวัสดุ

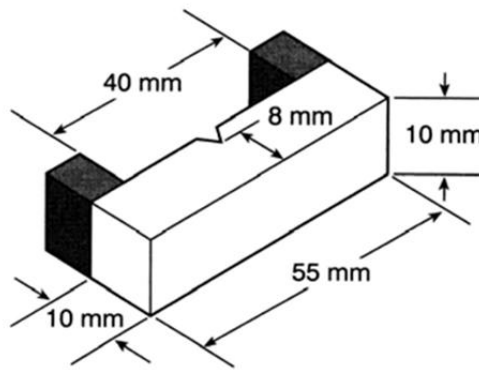


ภาพประกอบ 13 ชิ้นทดสอบการกระแทกแบบไอซอด (Izod test specimen)

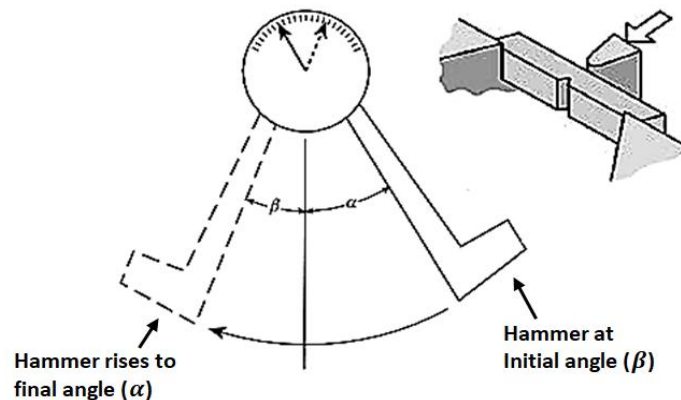
2.1.7.1 การทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact test)

ชิ้นงานทดสอบมาตรฐานมีขนาด 10 x 10 x 55 mm ดังแสดงในภาพประกอบ 14 และมีการบากตรงกลางชิ้นงานไว้ที่ด้านหนึ่ง ซึ่งบางการทดสอบต้องการร่องบากที่เป็นแบบรูกุญแจ (keyhole notch) หรือเป็นแบบตัววี (V-notch) โดยชิ้นทดสอบจะถูกวางไว้ระหว่างแท่นรองรับชิ้นงาน โดยวางให้ ผังตรงข้ามร่องบากหันไปในทางที่จะทำการกระแทก คือ ใบบิดที่ติดอยู่กับลูกตุ้มจะต้องกระแทกเข้ากับด้านหลังร่องบากของชิ้นงานที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างแท่นรองรับชิ้นงาน ดังแสดงในภาพประกอบ 2.15 จากนั้นทำการยกลูกตุ้มขึ้นไปยังมุมก่อน

กระแทก แล้วปล่อยลูกตุ้มเหวี่ยงลงมากระแทกกับชิ้นทดสอบลูกตุ้มกระแทกต้องยกขึ้นด้วยมุมที่ทราบค่าแน่นอนคือ α ดังแสดงภาพประกอบ 15 ในทางทฤษฎีถ้าลูกตุ้มไม่มีความต้านทานใดๆ เมื่อทำการปล่อยลูกตุ้มควรจะมีมุมหลังเหวี่ยงที่ด้านตรงข้ามเท่ากับมุม α เท่าเดิม ซึ่งในความเป็นจริงจะมีความเสียดทานของเครื่อง ดังนั้นในการทดสอบควรรวมพลังงานที่สูญเสียไปกับความเสียดทานเหล่านี้ด้วย เมื่อทำการทดสอบให้ยกลูกตุ้มไปที่มุม α จากนั้นวางชิ้นทดสอบเข้ากับแท่นวาง ปล่อยตุ้มน้ำหนักลงมาโดยให้เหวี่ยงอย่างอิสระเมื่อลูกตุ้มเหวี่ยงกระแทกกับชิ้นทดสอบจะเกิดการถ่ายพลังงานส่วนหนึ่งให้กับชิ้นทดสอบจนเกิดการแตกหัก จากนั้นลูกตุ้มจะเหวี่ยงเลยไปยังฝั่งตรงข้ามด้วยมุมน้อยกว่า β



ภาพประกอบ 14 ชิ้นทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy test specimen)



ภาพประกอบ 15 ลักษณะการทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี

ที่มา: ทิชัมพร เชื้อผู้ดี; ปุณยิศา ตระกูลผุดผ่อง; และ โยธิน หอมจุ. (2559. 22-24). สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมเหล็กหล่อสีเทา ASTM A-48.

เมื่อทำการบันทึกค่าน้ำหนักของลูกตุ้ม ความยาวของแขนลูกตุ้ม รวมทั้ง มุมยกเริ่มต้นกับมุมยกหลังกระแทกของลูกตุ้ม (α และ β) จากนั้นทำการคำนวณด้วยสมการ

$$E = mgr(\cos \beta - \cos \alpha) \quad (2.8)$$

เมื่อ E คือ พลังงานที่ใช้ในการแตกหักของชิ้นทดสอบ (N·m)

m คือ มวลของลูกตุ้ม (kg)

g คือ อัตราเร่งจากแรงดึงดูดของโลก (9.81 m/s^2)

r คือ ความยาวแขนลูกตุ้ม (m)

α คือ มุมยกลูกตุ้มเริ่มต้นก่อนกระแทก

β คือ มุมยกลูกตุ้มสุดท้ายหลังกระแทก

2.1.15 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Metallurgical Microscope)

โครงสร้างจุลภาค (microstructure) คือ สภาพหรือลักษณะของพื้นผิวที่ปรากฏของชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมเพื่อการตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ณ กำลังขยายสูงกว่า 25 เท่าขึ้นไป ในทางปฏิบัติการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะมักจะประกอบไปด้วยเกรน (Grain) และเฟสต่าง ๆ ซึ่งหากเป็นเนื้อหลักจะเรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) แต่หากเป็นก้อนเล็ก ๆ ในเนื้อหลักจะเหมาะเรียกรวม ๆ ว่า อนุภาค (Particle) โดยโครงสร้างจุลภาคนั้นอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยต่างๆ เช่น การหล่อโลหะ การอบชุบ และในการใช้งานที่มีความร้อน เป็นต้น

เหตุผลในการวิเคราะห์โครงสร้างและส่วนผสมทางเคมีของโลหะมีหลายประการ ได้แก่

- (1) เพื่อศึกษากลไกการเกิดโครงสร้างจุลภาคและความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคกับสมบัติต่างๆของโลหะ
- (2) เพื่อตรวจสอบหรือยืนยันคุณภาพของชิ้นงาน
- (3) เพื่อวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดกับชิ้นงานในระหว่างการใช้งาน
- (4) เพื่อการทำวิศวกรรมย้อนรอยชิ้นส่วนที่ผลิตจากโลหะชนิดหนึ่งๆ

เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคอาจเรียกรวมๆ ได้เป็นเทคนิคทางจุลทรรศน์ (microscopy) ซึ่งหลักๆ ประกอบไปด้วย

- (1) จุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopy: OM)
- (2) จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM)
- (3) จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิชชัน (Transmission Electron Microscopy: TEM)
- (4) จุลทรรศน์แบบอะตอมมิกฟอซซ์ (Atomic Force Microscopy: AFM)

2.1.16 เฟสไดอะแกรมของเหล็ก-คาร์บอน (Iron-Carbon Phase Diagram)

บริเวณหลอมละลายในเหล็กกล้า HSLA อาจจะนำไปเชื่อมโยงกับเฟสไดอะแกรมของเหล็ก-คาร์บอน ดังแสดงในภาพประกอบ 16 เมื่อจลศาสตร์ (Kinetic) ของการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วในระหว่างการเชื่อมต่อการเปลี่ยนเฟสบริเวณที่หลอมละลาย พิจารณาระยะที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนสอดคล้องกับพื้นที่ในการเชื่อมได้รับความร้อนต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ (Critical temperature: A_1)

เฟสไดอะแกรมของเหล็ก-คาร์บอน สำหรับกระบวนการทางความร้อนของเหล็กกล้า HSLA สามารถนำไปใช้ในการเชื่อมได้เป็นอย่างดี แต่พื้นฐานที่แตกต่างระหว่างการเชื่อมและกระบวนการทางความร้อนเป็นที่ยอมรับได้ ความร้อนในระหว่างการเชื่อมและกระบวนการทางความร้อนของเหล็กกล้า HSLA ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 17 โดยขั้นแรกอุณหภูมิเชื่อมสูงสุดบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนประมาณ $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่วนในกระบวนการทางความร้อนอุณหภูมิสูงสุดประมาณ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งไม่สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติบน (Upper critical temperature: A_3) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต้องการให้เกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite: γ) ขั้นที่สอง อัตราการให้ความร้อนสูงและรักษาเวลาเหนือเส้น A_3 สั้นกว่าในระหว่างการเชื่อม ยกเว้นการเชื่อมบางกระบวนการ เช่น Electroslag ในกรณีกระบวนการให้ความร้อน อัตราการให้ความร้อนจะช้ากว่าและเวลาการรักษาเหนือเส้น A_3 นานกว่า อุณหภูมิ A_1 และ A_3 ในระหว่างการให้ความร้อน (Chauffage) จะเรียกว่า Ac_1 และ Ac_3 ตามลำดับ

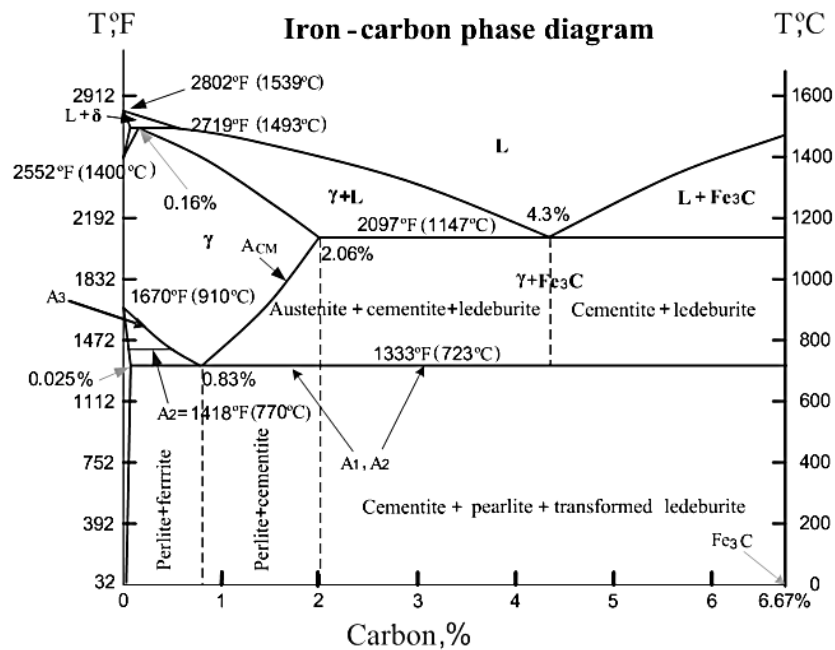
สำหรับเหตุผลทางด้านจลศาสตร์ อุณหภูมิ Ac_1 และ Ac_3 จะสูงกว่าอุณหภูมิ A_1 และ A_3 เล็กน้อย และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นหากเพิ่มอัตราการให้ความร้อนในระหว่างการเชื่อมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนเฟสต้องการการแพร่กระจาย (ยกเว้นการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์) และเวลาในการแพร่กระจาย นอกจากนี้ความร้อนในระหว่างการเชื่อม การเปลี่ยนเฟสอาจจะไม่เกิดที่อุณหภูมิ A_1 และ A_3 แต่จะเกิดขึ้นที่สูงกว่าอุณหภูมิ Ac_1 และ Ac_3

สำหรับเหล็กกล้า HSLA ปริมาณธาตุที่ฟอร์หมคาร์ไบด์ ได้แก่ วาเนเดียม (V) ทังสแตน (W) โครเมียม (Cr) ไทเทเนียม (Ti) และโมลิบดีนัม (Mo) จะทำให้

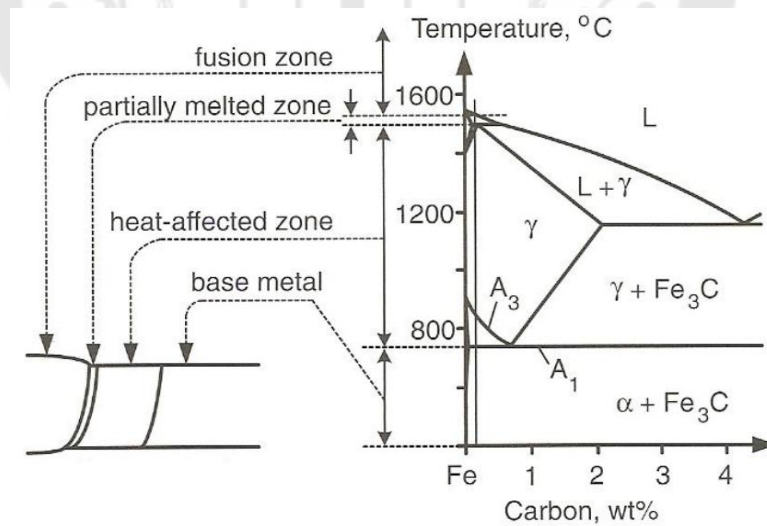
ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนมีความสำคัญมากขึ้น เพราะว่าอัตราการแพร่ของธาตุเหล่านี้ต่ำกว่าของคาร์บอน (C) และด้วยเหตุนี้ทำให้การเปลี่ยนเฟสช้ากว่าเมื่อมีธาตุที่ฟอร์หมคาร์ไบด์

ผลรวมของอัตราการให้ความร้อนสูงและเวลาที่อุณหภูมิอยู่เหนือ A_{c3} น้อยในการเชื่อมจะส่งผลให้เกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) ในการให้ความร้อน เพราะว่าเวลาไม่เพียงพอที่จะทำให้อะตอมของคาร์บอนในออสเทนไนต์ (Austenite) เกิดการแพร่จากบริเวณเดิมที่เป็นเพอร์ไลต์ (Pearlite) บางส่วนของปริมาณคาร์บอนสูงไปเป็นเพอร์ไรต์ (ferrite) บางส่วนของปริมาณคาร์บอนต่ำ เมื่อเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วเกิดเป็นมาร์เทนไซต์ (martensite) ที่บริเวณที่มีคาร์บอนสูง ในขณะที่บริเวณที่มีคาร์บอนน้อยกว่าจะกลายเป็นเพอร์ไรต์ (ferrite) ความแข็งแรงระดับจุลภาคในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนสามารถกระจายค่าความแข็งแรงในช่วงกว้าง

ผลของอุณหภูมิสูงในระหว่างการเชื่อมทำให้เกิดการเติบโตของเกรนใกล้บริเวณบริเวณหลอมละลาย อัตราการเย็นตัวต่ำทำให้เวลาที่อุณหภูมิอยู่เหนือ A_{c3} นาน ทำให้เกิดการเติบโตของเกรนเป็นไปอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามในกรณีของกระบวนการทางความร้อนอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่หลีกเลี่ยงการเติบโตของเกรน



ภาพประกอบ 16 เฟสไดอะแกรมของเหล็ก-คาร์บอน (Iron-Carbon Phase Diagram)



ภาพประกอบ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างการเชื่อมเหล็กกล้า HSLA และเฟสไดอะแกรมของเหล็ก-คาร์บอน

ที่มา: ญัฐพล ทองทิวัง; สุรศักดิ์ ทองประเสริฐ; และ อนุพงศ์ สิงห์ราชชัย. (2561). การศึกษาอัตราการเติมเนื้อเชื่อมและประสิทธิภาพในการเติมเนื้อโลหะของลวดเชื่อมไฟฟ้า

2.1.17 การวัดขนาดเกรน (Grain Size Measurement)

2.1.17.1 Spektor's Method

ขนาดของเกรนสามารถทำการวัดได้หลากหลายวิธี หนึ่งในนั้นคือ ซึ่งจะพิจารณาจากเส้นผ่านศูนย์กลาง ต่างๆจากการลากเส้นตรงหรือเส้นที่ตัดส่วนโค้งต่างๆผ่านวงกลม ซึ่งระยะห่างที่ตั้งฉากจากเส้นทดสอบถึงจุดศูนย์กลางของทรงกลมสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่

2.9

$$Z = \left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 - \left(\frac{I}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

เมื่อ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง

I คือ ความยาวของคอร์ด (Chord)

รูปร่างของเกรนเกิดจากการแพร่กระจายอย่างไม่มีรูปแบบนั้นไม่มีผลใดๆ ในการลากเส้นตรงนี้ ระบบการกระจายแบบโมโนเป็นเส้นผ่านศูนย์กลาง d ของวงกลม เมื่อพิจารณาปริมาตรทรงกระบอกของความยาว (L) และรัศมี (Z) จากจุดศูนย์กลาง ซึ่งปริมาตร (V) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.10 และความยาวของคอร์ดที่ตัดกันนั้นจะทำให้ความยาวคอร์ด (I) และเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) แปรผันกัน ซึ่งจำนวนของคอร์ดต่อหน่วยความยาวบนเส้นทดสอบสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2.11

$$V = \pi Z^2 L \quad (2.10)$$

$$(n_L)_I^d = \pi Z^2 N_V = \frac{\pi}{4} (d^2 - I^2) N_V \quad (2.11)$$

เมื่อ N_V คือ จำนวนของทรงกลมต่อหน่วยปริมาตร สำหรับระบบการกระจายแบบ โพลีของทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง $d_1, d_2, d_3, d_4, \dots, d_{max}$ และจำนวนต่อหน่วยปริมาตร $(N_V)_1, (N_V)_2, (N_V)_3, \dots, (N_V)_{max}$ ตามลำดับ ดังสมการที่ 2.12

$$(n_L)_I^{d_{max}} = \frac{1}{4} \sum \frac{\pi}{4} (d_j^2 - I^2) (N_V)_j \quad (2.12)$$

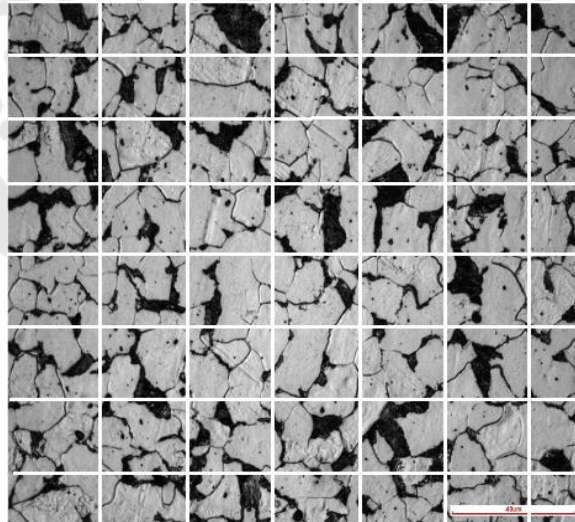
$$d(n_L)_0^I = \frac{\pi}{2} (N_V)_I^{d_{\max}} \quad (2.13)$$

เมื่อ $(n_L)_0^I$ คือ จำนวนคอร์ด (Chord) ตามความยาวระหว่าง 0 ถึง l ต่อหน่วยความยาวของเส้นทดสอบ ช่วงของความยาวคอร์ด (Chord) จะไม่มีสมบัติดีพอภายใน ช่วงของความยาว ดังสมการที่ 2.14

$$(N_V)_{j\Delta} = \frac{2}{\pi\Delta} \left[\frac{(n_L)_j - (n_L)_{j-1}}{\Delta \left(j - \frac{1}{2} \right)} - \frac{(n_L)_{j+1} - (n_L)_j}{\Delta \left(j + \frac{1}{2} \right)} \right] \quad (2.14)$$

เมื่อ $(N_V)_{j\Delta}$ คือ จำนวนของอนุภาคของค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลาง $j\Delta$ ต่อหน่วย ปริมาตรใน $j\Delta \pm \frac{\Delta}{2}$

$(n_L)_j$ คือ จำนวนของคอร์ดต่อหน่วยความยาวเส้นทดสอบ



ภาพประกอบ 18 Spektor's Method

ที่มา: Jeet Amrutiya. (n.d.: Online). ASTM E 112 Grain Size Measuring Methods full standard, mechanical.

2.1.17.2 Comparison Method

การตรวจสอบด้วยวิธีนี้จะต้องถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 100x แล้วนำไปเปรียบเทียบกับภาพโครงสร้างจุลภาคมาตรฐาน โดยต้องเลือกภาพมาตรฐานที่มีขนาดเกรนใกล้เคียงกับขนาดเกรนของชิ้นงานทดสอบที่สุด ซึ่งภาพมาตรฐานจะมีหมายเลขกำกับ เรียกว่า ASTM Grain Size Number ยิ่งมีเลขมาก เกรนยิ่งมีขนาดละเอียด วิธีนี้เหมาะสำหรับโครงสร้างจุลภาคที่มีขนาดเกรนส่วนใหญ่เป็นแบบ Equiaxed Grain

โดยนับจำนวนเกรนใน 1 ตารางนิ้ว จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 100x แล้วนำไปคำนวณหา ASTM Grain Size Number ดังสมการที่ 2.15

$$N = 2^{G-1} \quad (2.15)$$

เมื่อ N คือ จำนวนเกรนต่อตารางนิ้วที่กำลังขยาย 100x

G คือ ASTM Grain Size Number

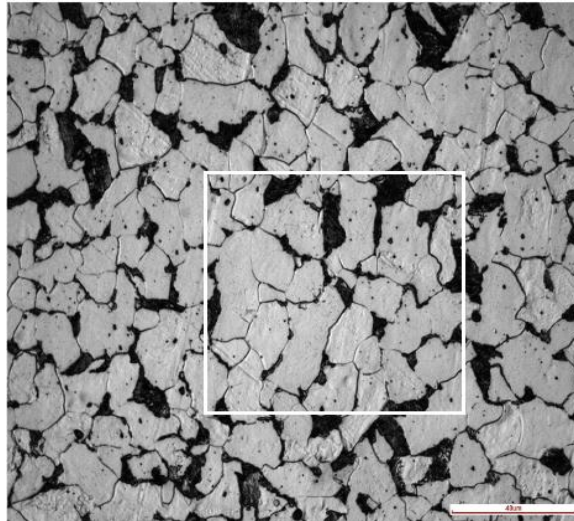
หากโครงสร้างจุลภาคละเอียดมาก ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 100x แล้วไม่สามารถนับจำนวนเกรนได้สะดวกให้ ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายสูงขึ้นแล้วคำนวณ Correction Factor (Q) ดังสมการที่ 2.16

$$Q = 2 \log_2 \left(\frac{M}{100} \right) = 6.64 \log_{10} \left(\frac{M}{100} \right) \quad (2.16)$$

เมื่อ Q คือ Correction Factor

M คือ กำลังขยายที่ใช้ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค

นำ Q ไปคูณกับ ASTM Grain Size Number ที่ได้จากภาพจึงจะได้ ASTM Grain Size Number ที่แท้จริง



ภาพประกอบ 19 Comparison Method

ที่มา: Jeet Amrutiya. (n.d.: Online). ASTM E 112 Grain Size Measuring Methods full standard, mechanical.

2.1.17.3 Planimetric Method

การตรวจสอบด้วยวิธีนี้จะทำการวาดวงกลมพื้นที่ 5000 mm^2 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 79.8 mm) บนภาพโครงสร้างจุลภาค ควรจะให้ภายในวงกลมมีเกรนอย่างน้อย 50 เกรน โดยนับจำนวนเกรนภายในวงกลม หากเกรนถูกขอบวงกลมตัดผ่านให้นับเป็น $1/2$ เกรน จากจำนวนเกรนให้นำไปคูณด้วย Jeffries Multiplier ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังขยายที่ใช้ถ่ายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 วิธีนี้เหมาะสำหรับโครงสร้างจุลภาคที่มีเกรนส่วนใหญ่แบบ Equiaxed Grain และสามารถคำนวณหา ASTM Grain Size Number ดังสมการที่ 2.17

$$N_A = f \left(N_{inside} + \frac{N_{intercept}}{2} \right) \quad (2.17)$$

เมื่อ N_A คือ จำนวนเกรนต่อ mm^2

f คือ Jeffries' Multiplier

N_{inside} คือ จำนวนเกรนในพื้นที่วงกลมทดสอบ

$N_{intercept}$ คือ จำนวนเกรนที่วงกลมตัดผ่าน

$$f = \frac{M^2}{5000} \quad (2.18)$$

เมื่อ f คือ Jeffries' Multiplier

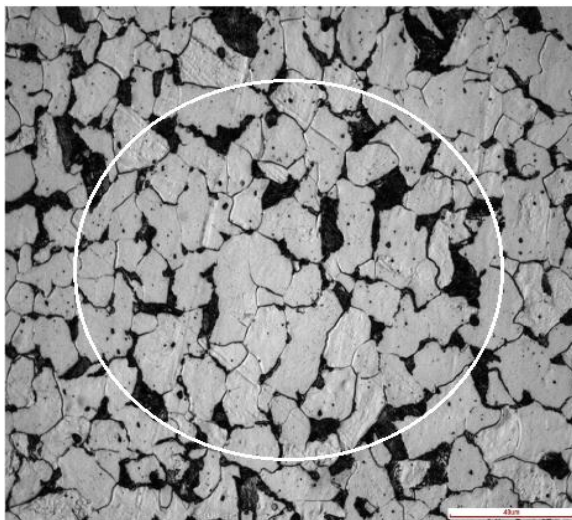
M คือ กำลังขยายที่ใช้ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค

ตาราง 4 Magnification-Jeffries' Multiplier

Magnification (M)	Jeffries' Multiplier (f)
1x	0.0002
10x	0.02
25x	0.125
50x	0.5
75x	1.125
100x	2.0
150x	4.5
200x	8.0
250x	12.5
300x	18.0
500x	50.0
750x	112.5
1000x	200.0

ที่มา: Jeet Amrutiya. (n.d.: Online). ASTM E 112 Grain Size Measuring Methods full standard, mechanical.

$$G = 3.322(\log N_A) - 2.954 \quad (2.19)$$



ภาพประกอบ 20 Planimetric Method

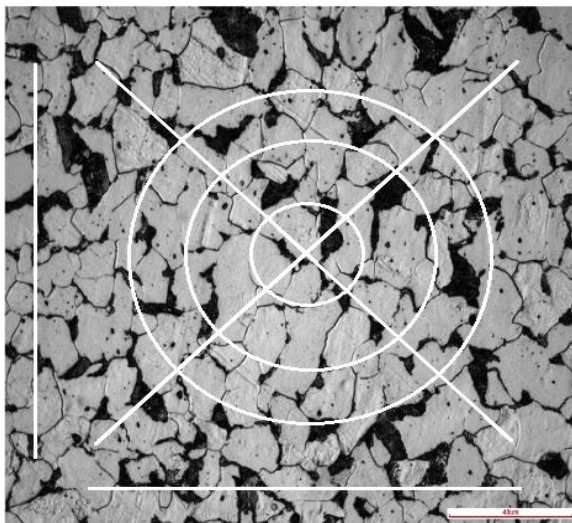
ที่มา: Jeet Amrutiya. (n.d.: Online). ASTM E 112 Grain Size Measuring Methods full standard, mechanical.

2.1.17.4 Intercept Method

การตรวจสอบวิธีนี้วัดเส้นที่รู้ความยาวบนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่รู้กำลังขยายโดยทั่วไปใช้วงกลม 3 วง ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 79.58 53.05 และ 26.53 mm ตามลำดับ ซึ่งมีความยาวเส้นรวมเท่ากับ 500 mm นับจำนวนขอบเกรนที่ถูกเส้นตัดเส้นผ่าน หากเส้นตัดผ่านจุดที่เป็นรอยต่อระหว่างเกรน 3 เกรน (Tripole Junction) ให้นับเป็น 1.5 นำผลรวมจำนวนเกรนที่ได้หารด้วยความยาวแท้จริงที่กำลังขยายของภาพถ่าย เช่น 500 mm ที่ 1x เท่ากับ 1mm ที่ 500x ดังสมการที่ 2.20 และสามารถคำนวณหา ASTM Grain Size Number ดังสมการที่ 2.21(19)

$$P_L = \frac{\text{จำนวนเกรนทั้งหมดภายในพื้นที่ทดสอบ}}{\text{ความยาวที่แท้จริงที่กำลังขยายของภาพ}} \quad (2.20)$$

$$G = -6.644 \left(\log \frac{1}{P_L} \right) - 3.288 \quad (2.21)$$



ภาพประกอบ 21 Intercept Method

ที่มา: Jeet Amrutiya. (n.d.: Online). ASTM E 112 Grain Size Measuring Methods full standard, mechanical.

นอกจากวิธีการวัดขนาดเกรนทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้วผู้ปฏิบัติงานยังสามารถตรวจวัดขนาดเกรนได้จากการเปรียบเทียบภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของโลหะที่ต้องการตรวจวัดกับชุดภาพมาตรฐานที่เป็นภาพเกรนจำลองที่ขนาดเกรนต่างๆกัน ชุดภาพมาตรฐานนี้สามารถหาได้จากมาตรฐานการทดสอบวัสดุและมาตรฐานอุตสาหกรรมหลักๆ แทบทุกมาตรฐาน การปฏิบัติงานด้วยวิธีนี้ค่อนข้างสะดวกและรวดเร็วจึงเหมาะกับการตรวจสอบผลิตภัณฑ์จำนวนมาก ข้อควรระวังของการตรวจวัดแบบนี้อยู่ที่กำลังขยายของภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่จะต้องตรงกับที่ระบุไว้ในชุดภาพมาตรฐาน

2.1.18 ความสัมพันธ์ฮอลล์-เพทช์ (Hall-Petch)

ขนาดเกรนมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของโลหะ เกรนที่อยู่ประชิดกันโดยปกติแล้วอาจมีทิศทางของผลึกที่แตกต่างกันได้ ลักษณะที่แตกต่างกันนี้เป็นเหตุให้เกิดของเกรน (Grain boundary) ซึ่งโลหะที่มีเกรนละเอียดมักจะมีความแข็งแรงมากกว่าโลหะที่มีเกรนหยาบ สามารถสังเกตได้จากการที่บริเวณขอบของเกรนที่เล็กกว่า มักมีพื้นที่ที่มากกว่าของของเกรนที่ใหญ่กว่าก่อให้เกิดแนวขวางการเคลื่อนที่ของการตกลูกที่ผิดปกติของอะตอม จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปได้มากกว่า เมื่อเทียบกับแรงกระทำที่เท่ากันต่อโลหะที่มีเกรนหยาบ ดังนั้นความแข็งแรงดึงจุดคราก (Yield strength) จึงแปรผันตามขนาดเกรน ดังสมการที่ 2.22

$$\sigma_y = \sigma_o + kd^{-\frac{1}{2}} \quad (2.22)$$

เมื่อ σ_y คือ ความแข็งแรงดึงจุดคราก

σ_o คือ ค่าคงที่สำหรับวัสดุจำเพาะ

K คือ ค่าคงที่สำหรับวัสดุจำเพาะ

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเกรน

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A.C. Hunt; et al. (1994) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความร้อนและความเจือจางต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า HSLA โดยทำการเปลี่ยนความร้อนที่ให้ในการเชื่อมและความเจือจางในการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerge Arc Welding: SAW) การทดลองทำโดยเจือจาง (Dilution) ที่ 40% และ 70% ความร้อนที่จ่าย คือ 2.2, 3.3, 4.6 และ 5.3 kJ/mm พบว่า acicular ferrite ไม่ขึ้นอยู่กับความร้อนที่จ่ายให้กับการเชื่อมส่วนการเจือจางของการเชื่อมมากจะมีรอยเชื่อมที่ตึกว่าการเจือจางน้อย

J. Adamczyk. (2006) ได้ทำการศึกษาการพัฒนาและเทคนิคในการก่อสร้างด้วยโครงสร้างประเภทเหล็กกล้า HSLA ที่มีส่วนผสมของไนโอเบียม (Nb) ไทเทเนียม (Ti) วาเนเดียม (V) และโบรอน (B) อยู่เล็กน้อย พบว่ากลไกที่ทำให้วัสดุมีขนาดของเกรนละเอียดหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับกระบวนการทางความร้อนที่เลือก การประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมส่วนมากมาจากความต้องการในการลดขั้นตอนการผลิตและลดการใช้พลังงานจากกระบวนการ Thermomechanic Treatment

Qiao Gui-ying. (2009) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของไนโอเบียม (Nb) และคาร์บอน (C) ต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนรูประงร้อนของเหล็กกล้า HSLA เกรด X80 ที่มีปริมาณ Nb สูง โดยการศึกษาเป็นการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่า ปริมาณของ Nb และ C มีผลอย่างมากกับพฤติกรรมการเปลี่ยนรูประงร้อนการเกิด Recrystallization activation

Danijela A. Skobir. (2011) ได้ทำการศึกษาความสำคัญของเหล็กกล้า HSLA กับงานก่อสร้างโครงสร้างโดยเหล็กกล้า HSLA ที่ศึกษานี้มีปริมาณส่วนผสมของไนโอเบียม (Nb) ไทเทเนียม (Ti) วาเนเดียม (V) และอลูมิเนียม (Al) อยู่เล็กน้อย ซึ่งธาตุต่างๆเหล่านี้ที่ผสมเข้าไปทำให้เหล็กมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นรวมทั้งทำให้เกิดความเสถียรของคาร์ไบด์ (Carbide) ไนไตรต์ (Nitrite) และคาโบไนไตรต์ (Carbonitrite) ในการเพิ่มของธาตุต่างๆอยู่ที่ไม่เกิน 0.1% และมีผลให้ความแข็งแรงคราก (Yield strength) มากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนแมงกานีส 2-3 เท่า

N. Bajic; et al. (2011) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของโลหะในการเติมลวดเชื่อมในโครงสร้างรอยเชื่อมของเหล็กกล้า HSLA เกรด X65 โดยตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้นนอกจากส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมแล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ให้กับรอยเชื่อมด้วยพบว่าลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของนิกเกิล (Ni) 1.4% และโมลิบดีนัม (Mo) 0.35% ให้ผลทางโครงสร้างที่บริเวณแนวเชื่อม (FZ) และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ดีกว่าลวดเชื่อมประเภทอื่นๆ อีกทั้งยังเปรียบเทียบความละเอียดของเกรนยังพบว่าดีที่สุดในส่วนนั้นๆ ยังมีค่าความทนทานการแตกหัก (Fracture toughness) ที่อุณหภูมิต่ำได้ดีอีกด้วย

Izzatul Aini Ibrahim; et al. (2012) ได้ทำการศึกษากระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding: GMAW) โดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในการเชื่อมให้กับเหล็กละมุน (Mild steel) ตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนนี้คือ ความเร็วในการเชื่อมและกระแสไฟเชื่อม พบว่ากระแสไฟเชื่อม ความเร็วในการเชื่อมมีผลต่อความลึกรอยเชื่อม และโครงสร้างจุลภาคพบว่าตัวแปรต่างๆทำให้ขอบเกรนมีขนาดแตกต่างกันออกไป

Shitong Wei; & Shanping Lu. (2012) ได้ทำการศึกษาการอบปกติ (Normalizing) แบบหลายครั้งเพื่อดูโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลในรอยเชื่อมของเหล็กกล้า HSLA เกรด S355 ที่ใช้ลวดเชื่อมแบบมีและไม่มีธาตุไนโอเบียม (Nb) พบว่า การเพิ่มปริมาณธาตุ Nb เข้าไปทำให้โครงสร้างของรอยเชื่อมดีขึ้น การเชื่อมง่ายขึ้น รวมทั้งการอบปกติจะทำให้คุณสมบัติทางกลที่รอยเชื่อมดีขึ้น

K.S. Chandravathi; et al. (2013) ศึกษาผลกระทบของโบรอน (B) และซีเรียม (Ce) ต่อการเกิดการแตกหักเนื่องจากครีพ (Creep Rupture) ของเหล็กกล้า HSLA เกรด 9Cr-1Mo ในบริเวณรอยเชื่อม โดยธาตุ B ที่ผสมนี้อยู่ในอัตราส่วน 100 ppm และ Ce อยู่ที่ 80 ppm พบว่า B จะส่งผลโดยตรงต่อความเสถียรของโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงในบริเวณ Creep Rupture ส่วน Ce มีผลต่อการเกิดโพรงในรอยเชื่อม การเพิ่มปริมาณ B และ Ce ทำให้ความแข็งแรงและความแข็งแรงของรอยเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วน Creep rupture ที่บริเวณรอยเชื่อมไม่เปลี่ยนแปลง

Anderson Clayton; et al. (2014) ได้ทำการศึกษาหาวิธีการในการเชื่อมเหล็กโครงสร้างเรือเหล็กกล้า HSLA เกรด AH36 ด้วยการเชื่อมแบบใต้อุณหภูมิ (Submerge Arc Welding: SAW) เพื่อหาค่าเวลาที่เหมาะสม ด้วยการเชื่อมแบบหนึ่งเส้นและสองเส้น และนำไปทดสอบการหาคุณสมบัติทางกลด้วยวิธีการทดสอบความแข็งแรงและ V-notch พบว่าการเชื่อมแบบสองเส้นให้ค่าความแข็งแรงและคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

Le Fu; et al. (2015) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welded: GTAW) ของเหล็กกล้า HSLA เกรด Al-Mg (Aluminium-Magnesium) ที่มีส่วนผสมของสแกนเดียม (Sc) และเออร์เบียม (Er) เล็กน้อย โดยทำการทดสอบความแข็งจุลภาค (Microhardness Test) ทดสอบความแข็งแรง (Tensile Test) ส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscope) พบว่าความแข็งแรงรอยเชื่อมของอัลลอยด์ที่ผสม Sc แข็งแรงกว่าผสมด้วย Er

Houman Alipooramirabed; et al. (2015) ได้ทำการหาค่าเชิงตัวเลขของความเค้นตกค้าง (Residual stress) ในรอยเชื่อมแบบหลายครั้งด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนนิวตรอน (Neutron diffraction) พบว่าการให้ความร้อนในรอยเชื่อมหลายครั้ง และความเร็วในการเชื่อมมีผลต่อค่าความแข็งแรงครากของรอยเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ขนาดของความเค้นตกค้างมีค่าลดลงเมื่อลดความร้อนที่ใส่เข้าไปในรอยเชื่อม และพบอีกว่าความเค้นตกค้างไม่มีผลกับการเปลี่ยนทิศทางการเชื่อมตราบใดที่ยังมีการเชื่อมแบบสม่ำเสมอ ในการศึกษาเดียวกันนี้ได้มีการขยายผลไปสู่การหาความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกลเพิ่มเติมด้วย และพบว่าค่าความเค้นตกค้างสูงสุดจะอยู่บริเวณไบไนต์ (Bainite) และ Widmanstten ferrite ในบริเวณแนวเชื่อม (FZ) และบริเวณ HAZ

Reza Ghomaschi; et al. (2015) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมแบบเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) ของเหล็กกล้า HSLA X70 ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้าเบอร์ E6010 แล้วตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope) พบว่าไม่มีมาร์เทนไซต์ (martensite) เกิดขึ้นที่โครงสร้างของรอยเชื่อม

Liangyun Lan; et al. (2016) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความเหนียวของเหล็กกล้า HSLA ที่ผ่านการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerge Arc Welding: SAW) แบบผ่านหลายครั้ง โดยลวดเชื่อมที่ใช้เป็นแบบไมโครอัลลอยด์ (Microalloy) ที่ประกอบด้วยธาตุต่างๆ เล็กน้อย การเชื่อมใช้การให้ความร้อนหลายรูปแบบ เพื่อดูว่าแบบไหนที่ทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงและเหนียวเหมาะสมที่สุด

Rishi Pamnani; et al. (2016) ได้ทำการศึกษาเพื่อค้นหาความจริงว่าการเชื่อมในรูปแบบต่างๆ กันจะมีผลอย่างไรต่อความเหนียวในรอยเชื่อม โดยการเชื่อมนี้ ใช้วิธีเชื่อมแบบ SMAW, SAW, FCAW และ A-GTAW เพื่อดูว่าในบริเวณรอยเชื่อมมีการแยกชั้น ขนาด และความหนาแน่น โดยใช้ซอฟต์แวร์ช่วยวิเคราะห์ พบว่า Area fraction และ Number inclusion ต่อดาราจ

มิลลิเมตรสูงสุด คือการเชื่อมแบบ SAW ตามด้วย FCAW , A-GTAW และ SMAW ตามลำดับ ข้อสังเกตที่ได้พบว่าขนาดของเกรนที่ละเอียดกว่าและส่วนประกอบต่ำกว่าจะมีค่าความเหนียวจากการกระแทกมากกว่า ณ อุณหภูมิปกติ จากผลการเชื่อมหลายรูปแบบพบว่าแบบที่ให้ขนาดของเกรนละเอียดจะมีความเหนียวมากกว่าแบบเกรนหยาบ

Peishan Zhou; et al. (2018) ทำการศึกษาการจำลองพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่มีเกรนใหญ่ (CGHAZs) ของท่อเหล็ก X90 โดยการจำลองจาก Gleeble 3500 ภายใต้การให้ความร้อนป้อนเข้า (Heat Input) ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 10 ถึง 50 kJ/cm เพื่อศึกษาผลของ HI ต่อการพัฒนาขอบเกรนและคุณสมบัติความเหนียวใน CGHAZ ของท่อเหล็ก X90 โดยให้ความร้อนป้อนเข้าที่ 25 kJ/cm ส่งผลให้พลังงานดูดซับแรงกระแทกได้สูงสุดคือ 267 J ความเหนียวแรงกระแทกลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความร้อนป้อนเข้าเพิ่มขึ้นจาก 25 kJ/cm เป็น 30 kJ/cm พลังงานดูดซับแรงกระแทกลดลงเป็น 18 J

Danijela A. Skobir (2011) ทำการศึกษาความสำคัญของเหล็กไมโครอัลลอยด์กับงานก่อสร้างโครงสร้าง โดยเหล็กอัลลอยด์ที่ศึกษานี้มีปริมาณส่วนผสมของ ไนโอเบียม ไทเทเนียม วานาเดียม และอลูมิเนียมอยู่เล็กน้อย ซึ่งธาตุต่างๆเหล่านี้ที่ผสมเข้าไปทำให้เหล็กมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นรวมทั้งทำให้เกิดความเสถียรของ คาร์ไบด์ ไนไตรต์ และคาโบไนไตรต์ ในการเพิ่มของธาตุต่างๆอยู่ที่ไม่เกินร้อยละ 0.1 และมีผลให้ความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield strength) มากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนแมงกานีส สองถึงสามเท่า

Anderson Clayton Nascimento Ribeiro, Hani Henein, Douglas G. Ivey, Sergio Duarte Brandi (2011) ได้ทำการศึกษาหาวิธีการในการเชื่อมเหล็กโครงสร้างเรือไมโครอัลลอยด์เกรด AH36 ด้วยการเชื่อมแบบ Submerge Arc welding (SAW) เพื่อหาค่าเวลาที่เหมาะสมด้วยการใช้ลวดเชื่อมแบบหนึ่งเส้นและสองเส้น และนำไปทดสอบการหาคุณสมบัติทางกลด้วยวิธีการทดสอบความแข็งและ V-notch พบว่าการใช้ลวดเชื่อมแบบสองเส้นให้ค่าความแข็งและคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

J. Adamczyk (2006) ได้ทำการศึกษาการพัฒนาและเทคนิคในการก่อสร้างด้วยโครงสร้างประเภทไมโครอัลลอยด์ที่มีส่วนผสมของ Nb, Ti, V และ B อยู่เล็กน้อย พบว่ากลไกที่ทำให้วัสดุมีขนาดของเกรนละเอียดหรือไม่เพิ่มขึ้นอยู่กับกระบวนการทางความร้อนที่เลือก การประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมส่วนมากมาจากความต้องการในการลดขั้นตอนการผลิตและลดการใช้พลังงานจากกระบวนการ เฮอร์ไมเมคคานิคที่รีเทนซ์

Liangyun Lan, Xiangwei Kong, Chunlin Qiu และ Dewen Zhao (2016) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความเหนียวของเหล็กไมโครอัลลอยด์ที่ผ่านการเชื่อมแบบ Submerged Arc Welded แบบผ่านหลายครั้ง โดยลวดเชื่อมที่ใช้เป็นแบบไมโครอัลลอยด์ที่ประกอบด้วยธาตุต่างๆเล็กน้อย การเชื่อมใช้การให้ความร้อนหลายรูปแบบ เพื่อดูว่าแบบไหนที่ทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงและเหนียวเหมาะสมที่สุด

Rishi Pamnani, T. Jayakumar, M. Vasudevan, และ T.Sakthivel (2014) ได้ทำการศึกษาเพื่อค้นหาความจริงว่าการเชื่อมในรูปแบบต่างๆกันจะมีผลอย่างไรต่อความเหนียวในรอยเชื่อม โดยการเชื่อมนี้ใช้วิธีเชื่อมแบบ SMAW, SAW, FCAW และ A-GTAW เพื่อดูว่าในบริเวณรอยเชื่อมมีการแยกชั้น ขนาด และความหนาแน่นเป็นเท่าไรโดยใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ พบว่า area fraction และ number inclusion ต่อตารางมิลลิเมตร สูงสุดคือ การเชื่อมแบบ SAW ตามด้วย FCAW , A-GTAW และ SMAW ตามลำดับ ข้อสังเกตที่ได้พบว่าขนาดของ inclusion ที่ละเอียดกว่าและส่วนประกอบต่ำกว่าจะมีค่าความเหนียวจากการกระแทกมากกว่า ณ อุณหภูมิปกติ จากผลการเชื่อมหลายรูปแบบพบว่าแบบที่ให้ ขนาดของเกรนละเอียดจะมีความเหนียวมากกว่าแบบเกรนหยาบ

Le Fu, Yongyi Peng, Jiwu Huang, Ying Deng, และ Zhimin Yin (2015) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของการเชื่อมด้วย Gas Tungsten Arc Welded Joint ของเหล็กไมโครอัลลอยด์ Al-Mg ที่มีส่วนผสมของ Sc และ Er เล็กน้อย โดยทำการทดสอบ Micro Hardness แรงดึง optical microscope พบว่า ความแข็งแรงรอยเชื่อมของอัลลอยด์ที่ผสม Sc แข็งแรงกว่าผสมด้วย Er

Houman Alipooramirabed, Anna Paradowska, Reza Ghomashchi และ Andrei Kotousov (2015) ได้ทำการหาค่าเชิงตัวเลขของความเค้นตกค้างในรอยเชื่อมแบบหลายครั้งด้วยวิธี neutron diffraction พบว่าการให้ความร้อนในรอยเชื่อมหลายครั้งและความเร็วในการเชื่อมมีผลต่อค่า Yielding Strength ของรอยเชื่อม และบริเวณ Heat Affect Zone ขนาดของความเค้นตกค้างมีค่าลดลงเมื่อลดความร้อนที่ใส่เข้าไปในรอยเชื่อม และพบอีกว่าความเค้นตกค้างไม่มีผลกับการเปลี่ยนทิศทางการเชื่อมตราบใดที่ยังมีการเชื่อมแบบสม่ำเสมอ ในการศึกษาเดียวกันนี้ได้มีการขยายผลไปสู่การหาความสัมพันธ์ของ คุณสมบัติทางกลเพิ่มเติมด้วย และพบว่าค่าความเค้นตกค้างสูงสุดจะอยู่ในบริเวณ bainite และ Widmanstten ferrite ในบริเวณรอยเชื่อม และบริเวณ HAZ

Qiao Gui-ying, Xiao Fu-ren, Zhang Xiao-bing, Cao Ya-bin และ Liao Bo (2009) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของ Nb และ C ต่อพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนรูปขณะร้อน ของเหล็กไมโครอัลลอยด์เกรด X80 ที่มีปริมาณ Nb สูง โดยการศึกษาเป็นการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่า ปริมาณของ Nb และ C มีผลอย่างมากกับพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนรูปร้อน การเกิด recrystallization activation

Reza Ghomaschi, Walter Costin และ Rahim Kurji (2015) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมแบบ SMAW ของเหล็กไมโครอัลลอยด์ X70 ด้วยลวดเชื่อม ไฟฟ้าเบอร์ E6010 ด้วยเครื่องมือ Optical และ Electron Microscope พบว่าไม่มี martensite เกิดขึ้นที่โครงสร้างของรอยเชื่อม

N.Bajic, V.Sijacki, B.Bobic, D. Cikara และ M.Arsic (2011) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของโลหะลวดเติมลวดเชื่อมในโครงสร้างรอยเชื่อมของเหล็กไมโครอัลลอยด์เกรด X65 โดยตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้นนอกจากส่วนผสมทางเคมีของลวดเติมแล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ให้กับรอยเชื่อมด้วย พบว่าลวดเติมเชื่อมที่มีส่วนผสมของ นิกเกิลร้อยละ 1.4 และโมลิบดีนัมร้อยละ 0.35 ให้ผลทางโครงสร้างที่รอยเชื่อมและ HAZ ดีกว่าลวดเติมเชื่อมประเภทอื่นๆ อีกทั้งยังเปรียบเทียบความละเอียดของเกรนยังพบว่าดีที่สุดนอกจากนั้นยังมีค่า Fracture toughness ที่อุณหภูมิต่ำดีอีกด้วย

A.C. Hunt, A.O. Klucken และ G.R.Edwards (1994) ศึกษา ผลกระทบของความร้อนและความเงาต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของเหล็กไมโครอัลลอยด์ โดยทำการเปลี่ยนความร้อนที่จ่ายและความเงาในขณะเชื่อมแบบ submerge arc การทดลองทำโดยเงา (dilution) ที่ร้อยละ 40 และ 70 ความร้อนที่จ่ายคือ 2.2, 3.3, 4.6 และ 5.3 kJ/mm พบว่า acicular ferrite ไม่ขึ้นอยู่กับความร้อนที่จ่ายให้กับการเชื่อมส่วน การเงาของการเชื่อมมากจะมีรอยเชื่อมที่ดีกว่าการเงาที่น้อย

Izzatul Aini Ibrahim, Syarul Asraf Mohamat, Amalina Amir และ Abdul Ghalib (2012) ได้ศึกษากระบวนการเชื่อมแบบ GMAW โดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในการเชื่อมให้กับเหล็ก Mild steel ตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนนี้คือ ความเร็วในการเชื่อม กระแสที่ใช้ พบว่ากระแสที่ใช้ในการเชื่อม ความเร็วการเชื่อมมีผลต่อความลึกกรวยเชื่อม และโครงสร้างจุลภาคพบว่าตัวแปรต่างๆ ทำให้ขอบเกรนมีขนาดแตกต่างกันออกไป

K.S. Chandravathi, K.Laha, Norio Shinya และ M.D. Mathew (2013) ศึกษาผลกระทบของ Boron และ Cerium ต่อการเกิด Creep Rupture ของเหล็กไมโครอัลลอยด์เกรด

9Cr-1Mo ในบริเวณรอยเชื่อม โดย Boron ที่ผสมนี้อยู่ในอัตราส่วน 100 ppm และ Cerium อยู่ที่ 80 ppm พบว่า Boron จะส่งผลโดยตรงต่อความเสถียรของโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงในบริเวณ Creep Rupture ส่วน Cerium มีผลต่อการเกิดโพรงในรอยเชื่อม การเพิ่มปริมาณ Boron และ Cerium ทำให้ความแข็งแรงและความแข็งแรงของรอยเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นส่วน Creep rupture ที่บริเวณรอยเชื่อมไม่เปลี่ยนแปลง

Shitong Wei และ Shanping Lu (2012) ทำการศึกษาการทำ Normalizing แบบหลายครั้งเพื่อดูโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลในรอยเชื่อมของเหล็กไมโครอัลลอยด์เกรด S355 ที่ใช้ลวดเชื่อมแบบมีและไม่มีธาตุ Nb พบว่า การเพิ่มปริมาณธาตุ Nb เข้าไปทำให้โครงสร้างของรอยเชื่อมดีขึ้น การเชื่อมง่ายขึ้นรวมทั้งการทำ Normalize จะทำให้คุณสมบัติทางกลที่รอยเชื่อมดีขึ้น

R. Prokić Cvetković, O. Popovića, R. Jovičić, N. Milošević, Z. Burzić, I. Cvetković Microstructural and fracture analysis of microalloyed steel weld metal. (2018) ได้ทำการศึกษา พฤติกรรมการแตกหักของวัสดุไมโครอัลลอยด์ที่มีส่วนประกอบหลักคือธาตุไนโอเบียม วัสดุนี้เป็นเหล็กแผ่น Ferrite-pearlite ที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการ MIG ลวดเชื่อมแบบ VAC60Ni โดยทำการควบคุม ความร้อนในกระบวนการเชื่อมไม่ให้เกิน 250 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการตัดชิ้นงานเพื่อทำไปทำการทดสอบการแตกหัก (Impact testing) ด้วยเครื่องมือ Charpy pendulum โดยการควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานที่ -55, 20 และ -40 องศาเซลเซียส การหาพลังงานในการแตกหักได้แบ่งออกเป็นสามชนิดคือ พลังงานเริ่มต้นในการแตกหัก พลังงานที่แพร่กระจาย และพลังงานรวมของการแตกหัก พบว่าพลังงานรวมในการแตกหักที่อุณหภูมิห้อง (20 องศาเซลเซียส) มีค่าสูงสุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิต่ำ (-40 องศาเซลเซียส) สุดท้ายคือที่อุณหภูมิต่ำมาก (-55 องศาเซลเซียส) พลังงานเริ่มต้นในการแตกหักมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนพลังงานที่แพร่กระจายคล้ายคลึงกันกับพลังงานรวม ในงานวิจัยนี้ได้มีการสรุปเพิ่มเติมว่า

- โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมประกอบด้วยรูปแบบทางสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกันเช่น เฟอร์ไรต์โปร - ยูเทคทรอยด์เฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และที่เฟสทุติยภูมิและอซิคูลาร์เฟอร์ไรต์ การที่มีอซิคูลาร์เฟอร์ไรต์ขนาดใหญ่มีผลในทิศทางที่ดีขึ้นต่อความทนทาน

- ที่อุณหภูมิห้องพลังงานการเติบโตของรอยร้าวจะสูงกว่าพลังงานการเริ่มต้นของรอยแตก ในขณะที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส และ -55 องศาเซลเซียส นั้น ผลออกมาตรงข้ามอย่างสมบูรณ์ เช่นพลังงานการเริ่มต้นของรอยร้าวจะสูงกว่าพลังงานการเติบโตของรอยร้าว

- เมื่ออุณหภูมิลดลงสัดส่วนของการแตกหักที่เปราะจะเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถยืนยันโดยแผนภาพของ Ferrite- Disferrite ที่ตรวจพบ

- การตรวจสอบ Fractographic ของชิ้นงานแบบ Charpy บ่งชี้ว่าที่การแตกหักแบบเกรนของ transgranular ที่อุณหภูมิห้องมีความโดดเด่นโดยมีการแตกหักแบบเกรน transgranular เพราะเล็กน้อย ที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียสการแตกหักเกิดขึ้นแบบ transgranularly ในขณะที่อุณหภูมิ -55 องศาเซลเซียส สัดส่วนของการแตกหักแบบเปราะจะสูงกว่าและสังเกตได้จากการแตกหักแบบเกรนและแบบ intergranular ของการแตกหักแบบเปราะ สิ่งนี้สามารถอธิบายได้โดยการมีส่วนร่วมอย่างมีนัยสำคัญของ pro-eutectoid ferrite และ ferrite ด้วยเฟสทุติยภูมิที่เส้นขอบของออสเทนนิติกดั้งเดิมซึ่งมีลักษณะความเหนียวต่ำ

- การแตกหักแบบเปราะ Intergranular จะโดดเด่นมีผลอย่างมากเมื่อพลังงานการแพร่กระจายจะมีขนาดน้อยกว่าพลังงานการเริ่มต้น

Liangyun Lan , Xiangwei Kong, Chunlin Qiu, Dewen Zhao (2016) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมอาร์คแบบใต้ฟลักซ์ กับโครงสร้างเหล็กกล้าไมโครอัลลอยด์เกรดเทียบเคียงกับ X100 ซึ่งเป็นเหล็กที่ผ่านกระบวนการรีดร้อน หน้า 20 mm. เหล็กนี้มีค่าความเค้นที่จุดคราก 750 MPa ความเค้นประลัย 930 MPa มีค่าการดูดซับพลังงานการตีที่ -20 Celcius เท่ากับ 196 J การเชื่อมเป็นแบบ Multi-pass ลวดเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมเป็นแบบเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูงโดยใช้ขั้วไฟฟ้า ใช้กระบวนการบ้อนความร้อนที่แตกต่างกันสามารถกระบวนการเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลที่สอดคล้องกันของการเชื่อม เน้นที่การศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของโลหะเชื่อมและ HAZ ที่มีความร้อนอินพุตแตกต่างกัน เพื่อเผยให้เห็นการแตกหักแบบไมโครและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระบบการเชื่อม ตามผลการทดลองที่ยอมรับได้เพื่อตรวจสอบพารามิเตอร์การเชื่อมสำหรับเหล็กที่ทำการศึกษาเพื่อให้ได้สมดุลที่ดีของความแข็งแรงสูงและความเหนียวของรอยเชื่อมร่วมกัน ช่วงที่เหมาะสมที่สุดของการกระจายขนาดของการรวมอโลหะที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมและสาเหตุสำคัญของการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของที่บริเวณ HAZ

ในงานวิจัยนี้ได้มีการสรุปเพิ่มเติมว่า

- โครงสร้างจุลภาคหลักของบริเวณรอยเชื่อม WM เป็นอซิคูดล่าเฟอร์ไรต์โดยไม่คำนึงถึงความร้อนแม้ว่าขนาดความกว้างของระแนงเพอริติกจะเพิ่มขึ้นด้วยความร้อนอินพุต ในขณะที่โครงสร้างจุลภาคในหลัก CGHAZ เปลี่ยนจากระแนง bainite และ martensite เต็มไปด้วยเกรนหยาบของ bainite ด้วยการเพิ่มความร้อน

- ความแข็งแรงของรอยเชื่อมจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความร้อนอินพุต สำหรับความทนทานต่อแรงกระแทกที่บริเวณ WM ความเหนียวและการแตกหักคือการแตกหักแบบ

เหนียวที่สภาพความร้อนใด ๆ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากอซิคูล่าเฟอไรต์ที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามความทนทานของ HAZ ลดลงอย่างเห็นได้ชัดด้วยการบ่อนความร้อนการแตกหักที่สอดคล้องกัน การแตกหักแบบผสมมีความคล้อยและความแตกหักเพื่อให้แตกหักการเชื่อมพารามิเตอร์ที่มีอินพุตความร้อน 1.43 kJ / mm เป็นที่ยอมรับได้ต่อประสิทธิภาพสูง

-การรวมตัวของออกไซด์ไทเทเนียมที่มีขนาดใหญ่จะมีความแข็งแรงมากกว่าความสามารถในการเสริมการเกิดนิวเคลียสของอซิคูล่าเฟอไรต์ที่มีขนาดเล็กกว่านั้น อย่างไรก็ตามการรวมที่มีขนาดใหญ่สามารถใช้งานได้ทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักแบบเหนียวและแตกหักบนผลกระทบที่ไม่เข้ากันของสองประการเหล่านี้ ช่วงที่เหมาะสมของการรวมขนาดมีค่าเป็น 0.45 μm ถึง 1 μm

Liangyun Lan, Chunlin Qiu, Dewen Zhao, Xiuhua Gao, Linxiu Du, (2015) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคและความเหนียวโดยการจำลองขนาดเกรนหยาบในบริเวณผลกระทบของรอยเชื่อม (CGHAZ) ของวัสดุที่เป็นเหล็กคาร์บอนต่ำ การทดสอบใช้การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี หลังจากที่มีการจำลองการทดสอบการเชื่อมด้วยเวลาในการเย็นตัวที่แตกต่างกัน การสังเกตโครงสร้างจุลภาคและวิเคราะห์คุณสมบัติโครงสร้างของผลึกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดติดตั้งระบบกระจายอิเล็กตรอนกระจายกลับ (EBSD) ตามลำดับ โครงสร้างจุลภาคหลักของการจำลองชิ้นงานเปลี่ยนจากระแนงมาร์เทนไซต์เป็นไบไนต์แบบหยาบด้วยการเวลาถ่ายเทความร้อนนานขึ้น การเสื่อมสภาพของความเหนียวเกิดขึ้นเมื่อเวลาในการทำความเย็นอยู่ในช่วง 10 ถึง 50 s. เมื่อเปรียบเทียบความเหนียวของโลหะพื้นฐานและความเหนียวจะน้อยลงอย่างมากเมื่อเวลาในการทำความเย็นเพิ่มขึ้นเป็น 90 วินาทีขึ้นไป ส่วนประกอบ MA (martensite - austenite) เป็นภาวะหลักสำหรับความเหนียวต่ำของการจำลองบริเวณ CGHAZ ที่มีเวลาในการระบายความร้อนสูงเนื่องจากส่วนประกอบ MA ขนาดใหญ่ช่วยลดการแตกร้าว สำหรับการเพิ่มขึ้นของพลังงานการแตกร้าว ขนาดของแขนงเกรนมาร์เทนไซต์ขนาดเล็กมีประสิทธิภาพและมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงพลังงานการขยายตัวของรอยแตก ในทางตรงกันข้าม การไม่หมุนของขอบเขตในบริเวณไบไนต์แบบหยาบดูเหมือนว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยของความเหนียว เพราะมีผลการแตกหักแบบเล็กๆของไบไนต์แบบหยาบที่ถูกควบคุมโดยรอยแตกเบื้องต้น ในงานวิจัยนี้ได้มีการสรุปเพิ่มเติมว่า

- สันฐานวิทยาของการจำลองโครงสร้างจุลภาคที่ CGHAZ มีการเปลี่ยนแปลงจากระแนงของมาร์เทนไซต์ไปเป็นไปไนต์หยาบด้วยการเพิ่มขึ้นของเวลาในการระบายความร้อนของ $\Delta t_{(8/5)}$ พร้อมด้วยการลดลงอย่างเห็นได้ชัดของความแข็ง อัตราส่วนปริมาตรของ MA ส่วนประกอบยังเพิ่มขึ้นและการวิเคราะห์สันฐานของมันพบว่าเปลี่ยนไปจากรูปร่างจุดเล็ก ๆ ยึดออกมาเป็นก้อนเล็กๆเมื่อเวลาระบายความร้อนเพิ่มขึ้น

- พลังงานรวมของการดูดซับทั้งหมดสามารถแยกออกเป็น พลังงานเริ่มต้นรอยแตกจากและพลังงานการขยายตัวตามค่าโหลดสูงสุด ความเหนียวของชิ้นงานที่ CGHAZ เสื่อมสภาพในอัตราการณ์สูงและจะยิ่งแย่งเมื่อเวลาในการทำความเย็นยาวนานถึง 90 วินาทีหรือมากกว่า แนวโน้มการแปรผันของพลังงานการเริ่มต้นของรอยร้าวคล้ายกัน เมื่อเพิ่มเวลาในการระบายความร้อนความทนทานต่อแรงกระแทกโดยจะมีรอยร้าวที่คล้ายกัน

- ระบุบริเวณมาเทนไซต์ของชิ้นงานที่มีอัตราการณ์สูงจะมีความหนาแน่นของโครงสร้างผลึกสูงกว่าและชิ้นงานบริเวณของ Bainite หยาบมีอัตราการณ์ต่ำตามผลลัพธ์ของ EBSD บริเวณที่โครงสร้างผลึกสูงในระแนงมาร์เทนไซต์ มีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงพลังงานการขยายตัวของรอยแตกเพราะพวกมันสามารถเบี่ยงเบนหรือจับการขยายของรอยแตกจุลภาคอย่างมีประสิทธิภาพ

- แม้ว่าองค์ประกอบขนาดใหญ่ของ MA และพื้นที่ของ bainite หยาบทำให้ความแข็งแรงลดลงในอัตราการณ์ต่ำของชิ้นงานตัวอย่าง ส่วนประกอบ MA ขนาดใหญ่จะเป็นภาระหลักสำหรับความแข็งแรงต่ำเพราะดูดซับพลังงานที่ดีมาก การแตกของรอยแตกจุลภาคจำนวนมากก่อให้เกิดการเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน เพื่อนำไปสู่ของการแตกหักสุดท้าย ดังนั้นการแตกหักแบบเกรนหยาบของbainite ถูกควบคุมโดยการเริ่มต้นของรอยแตกและผลกระทบของบริเวณตัวโครงสร้างผลึกที่สูงในการขยายรอยแตกเกือบหายไปในพื้นที่ของ bainite แบบหยาบ

Leandro de Jesus Jorge, Verônica Scarpini Cândido, Alisson Clay Rios da Silva,

Fabio da Costa Garcia Filho, Artur Camposo Pereira, Fernanda Santos da Luz,

Sergio Neves Monteiro, (2019) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการเปรียบเทียบการใช้เงื่อนไขกระบวนการทางความร้อนที่แตกต่างกันในการเชื่อมเหล็กไมโครอัลลอยด์ HSLA-80 การดำเนินการนี้เริ่มโดยการเชื่อมชิ้นงานแบบมัลติพาสโดยใช้กระบวนการเชื่อมด้วยอิเล็กโทรดแบบเคลือบผิว ในสภาพการรักษาความร้อนที่แตกต่างกันโดยให้ความร้อนและ

ไม่ให้ความร้อนก่อนหรือหลังการเชื่อมเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อกลไกเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคสำหรับแต่ละสภาวะ หลังจากทำการเชื่อมแล้วขั้นตอนในการระบุโครงสร้างทางจุลภาคและลักษณะพฤติกรรมทางกลได้ดำเนินการต่อไป ผลการทดสอบทางกลและการวิเคราะห์ทางโลหะวิทยาได้ข้อสรุปว่ากระบวนการทางความร้อนไม่มีความจำเป็นต้องทำเสริมกระบวนการเชื่อมของเหล็กนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีของการรักษาความร้อนหลังการเชื่อม ในความเป็นจริงการใช้กระบวนการทางความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิเหล่านี้ไม่ได้ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญทั้งโครงสร้างจุลภาคหรือลักษณะทางกลของวัสดุ ในงานวิจัยนี้ได้มีการสรุปเพิ่มเติมว่า

- การเชื่อมอิล็กโทรดแบบเคลือบของเหล็ก HSLA-80 ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่แตกต่างกัน: เช่น ให้ความร้อนก่อน ก่อนและหลัง และให้ความร้อนทีหลัง รวมทั้งไม่มีการให้ความร้อนก่อนและหลังเชื่อม ผลการวิจัยพบเพียงอิทธิพลเล็กน้อยของกระบวนการทางความร้อน
- ชิ้นงานที่ไม่ได้มีการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมพบว่าโดยทั่วไปแล้วจะมีแกนเฟอร์ไรต์อซิคูลาร์แบบเสถียรในโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อม เนื่องจากอัตราการเย็นตัวสูงขึ้น สิ่งนี้ส่งเสริมความต้านทานขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกับความแข็งที่ค่อนข้างสูง
- สภาพก่อนและหลังการให้ความร้อนนอกเหนือไปจาก 40% ของอซิคูลาร์เฟอร์ไรต์เหนียวทำให้เกิดการก่อตัวของขอบเขตเม็ดเฟอร์ไรต์และเฟอร์ไรต์ขอบเกรนเล็กน้อย ประมาณ 60% ของพื้นที่ที่ถูกทำให้ร้อนขึ้นและอาจทำให้ประสิทธิภาพของรอยต่อลดลง
- การวัดความแข็งเผยให้เห็นค่าที่สูงขึ้นอย่างมากในโลหะเชื่อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเงื่อนไขที่สอดคล้องกับการขาดทั้งก่อนหรือหลังการให้ความร้อน
- ความเหนียวที่วัดโดยการดูดซับของเครื่องทดสอบการแตกหักแบบชาร์ปีของพลังงานที่ดูดซับได้สูงกว่าในบริเวณผลกระทบของรอยเชื่อม(HAZ) มากกว่าในโลหะเชื่อมสำหรับสภาวะที่ได้รับความร้อน อย่างไรก็ตามความเหนียวของโลหะเชื่อมนั้นสูงขึ้นสำหรับสภาพที่ไม่ได้ให้ความร้อนก่อนและหลังเชื่อม

Jorge Carlos Ferreira, Jorge Joel Lemos, Dias, Monteiro, Antonio José de Carvalho, Gomes, Salvini de Souza, Bottb, Luís Felipe Guimarães de Souza, Matheus Campolina Mendes, Leonardo Sales Araújo, (2019) การวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาวิธีการที่เหมาะสมในการเชื่อมโครงสร้างเหล็กไมโครอัลลอยด์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมนอกชายฝั่งทะเล เพื่อเพิ่มผลผลิตของการทำงาน การวิจัยได้มุ่งเน้นไปที่วิธีการเชื่อมแบบ Shield Metal Arc Welding (SMAW) และ Gas Metal Arc Welding (GMAW) กระบวนการเชื่อมนี้มีกระบวนการให้ความร้อนก่อนเชื่อมที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส กับแผ่นเพลทขนาด 750x150x19 มม. หลังจากการเชื่อม

แล้วมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสอีกครั้งเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการให้ความร้อน การทดสอบคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างทางจุลภาค ใช้วิธีการทดสอบด้วยเครื่องส่องกล้องแบบจุลทรรศน์(OM) การส่องกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) และเครื่องส่องสะท้อนกลับ(EBSD) ส่วนการหาค่าทางความร้อนใช้เครื่องมือที่เป็นซอฟต์แวร์ Thermo-Calc เพื่อประเมินการเกิดขึ้นของ คาร์ไบด์หลังจากการให้ความร้อนหลังเชื่อม ในงานวิจัยนี้ได้มีการสรุปเพิ่มเติมว่า

- รอยเชื่อมของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่ได้จากกระบวนการ GMAW มีคุณสมบัติทางกลเทียบเท่ากับกระบวนการ SMAW
- กระบวนการทางความร้อนแบบให้ความร้อนหลังการเชื่อมไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน
- การประมาณค่าทางอุณหพลศาสตร์ของเฟสแสดงให้เห็นว่าคาร์ไบด์ที่อุดมไปด้วย Cr และ Mo เป็นที่คาดหวังสำหรับโครงสร้างทางจุลภาค อย่างไรก็ตามปริมาณของคาร์ไบด์นั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Cr / C และ Mo / C ในอีกด้านหนึ่งอัตราส่วนของ Cr / C และ Mo / C ที่ต่ำกว่านั้นจะเหมาะสำหรับ M7C3 และ MC carbides ตามลำดับในขณะที่อัตราส่วนของ Cr / C และ Mo / C ที่สูงขึ้นนั้นจะช่วยให้เกิด M23C6 และ M6C
- เวลาทำความเย็นที่ยาวนานกว่าแสดงแนวโน้มที่จะเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกและการลดความแข็งแรงเชิงกลของโลหะเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่ได้จากกระบวนการเชื่อมแบบ GMAW
- การใช้กระบวนการเชื่อมแบบ GMAW สามารถส่งเสริมการเพิ่มความเหนียวของรอยเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยคุณภาพที่ดี

Peishan Zhoua, Bin Wang, Liang Wang, Yiwen Hue, Luo Zhou, (2018) ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อศึกษาเพื่อจำลองหาพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนของเกรนย่อย(CGHAZ)การเชื่อมเหล็กกล้าไมโครอัลลอยด์เกรด X90 ด้วยเครื่องจำลองการเชื่อมรุ่น Gleeble 350 ชิ้นงานที่ทดสอบเป็นเหล็กกล้าในกลุ่ม API 5L(X90) ซึ่งเป็นเหล็กทำท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1219 มม. 16 mm. การให้ความร้อนเป็นการให้ความร้อนตั้งแต่ 10 – 50 kJ/cm. เพื่อศึกษาผลกระทบของความร้อนอินพุต(HI) ต่อการพัฒนาขอบเขตของเกรนและคุณสมบัติความเหนียวใน CGHAZ ของท่อเหล็ก X90 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า

- สัดส่วนของ LB ลดลงเมื่อมีการเพิ่มของความร้อน และสัดส่วนของ GB เพิ่มขึ้น ด้วย การผสมผสานกันเป็นอย่างดีเยี่ยมของ GB และ LB เมื่อมีความร้อนอินพุต 25 kJ/cm. ผลนี้ ตรวจสอบได้จากค่าความต้านทานแรงกระแทกมีค่าสูงสุด

- การวิเคราะห์ EBSD แสดงให้เห็นว่าจำนวน HAGB เพิ่มขึ้นก่อนจากนั้นจึงลดลง ตามจำนวนของความร้อนที่เพิ่มขึ้นมา ค่าต่ำของ Σ CSLs อาทิ $\Sigma 3$, $\Sigma 11$, $\Sigma 25b$ ลดลงเมื่อความร้อนเพิ่มขึ้น

- สำหรับการจำลอง CGHAZs ของท่อเหล็ก X90 ส่วนประกอบ M / A ไม่สามารถนำไปสู่การเพิ่มให้เกิดการดูดซับแรงกระแทกโดยตรงได้

Sanjeev Kumar, S.K. Nath, (2016) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับตัวอย่างทางกายภาพของชิ้นงานที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนของรอยเชื่อมบริเวณ (CGHAZ) ชิ้นงานที่ใช้ในการเชื่อมคือเหล็กเกรด HY 85 กับความร้อนที่ใช้ 1.5, 2.2, 5.0 kJ / mm ถูกเตรียมโดยเครื่องจำลองทางความร้อน และความทนทานต่อแรงกระแทกถูกทดสอบที่อุณหภูมิทดสอบตั้งแต่อุณหภูมิต่ำจนถึง -196°C การเปลี่ยนแปลงความเหนียวมาสู่วัสดุเปราะ (DBTT) ถูกกำหนดโดยสองวิธี คือ 1. ผลกระทบค่าความแข็งแรงโดยเฉลี่ยของสูงสุดและต่ำสุด 2. อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงลักษณะการแตกหัก (FATT) จากภาพของ SEM ค่าความเหนียวและความแข็งแรงลดลงเมื่อความร้อนเข้าเพิ่มขึ้น การลดลงนี้เป็นอัตราการระบายความร้อนช้าลงทำให้ขนาดเกรน austenite เพิ่มขึ้นจากก่อนหน้า และเพิ่มความกว้างของแถบ bainitic ferrite, DBTT ถูกหาได้สำหรับบริเวณเนื้อชิ้นงานและรอยเชื่อม CGHAZ ตามเกณฑ์พลังงานสูงสุดและต่ำของชิ้นงาน โดยวิธีการ FATT ที่ใช้เครื่องส่อง SEM นั้นใช้ได้เฉพาะกับบริเวณเนื้อชิ้นงาน แต่ใช้ไม่ได้สำหรับแนวเชื่อม CGHAZ เพราะมีลักษณะเปราะบาง การบ่อนความร้อนที่เหมาะสมที่ความแข็งแรงและแรงกระแทกที่ดีที่สุดคือ 22 kJ / cm โดยสังเกตได้ที่ 66 J และ 322 VHN ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ได้มีการสรุปเพิ่มเติมว่า

- ความร้อนขาเข้า 1.5 kJ / mm และ 2.2 kJ / mm เหมาะสำหรับการเชื่อมแบบผ่านรอบเดียว (Singlepass) ของเหล็ก HY 85 โดยดูจากความทนทานต่อแรงกระแทก ที่ความร้อนที่ได้ 5.0 kJ / mm ไม่พบความเหมาะสมใดๆ เนื่องจากมันทำให้เกิดความกว้างของรอยของ bainitic ferrite หยาบเช่นเดียวกับค่า PAGS ที่เพิ่มจำนวนเกรน bainite ขึ้นแล้วลดจำนวน martensite และมี M-A ที่เป็นองค์ประกอบ

- ปริมาณสารใน PAGS ที่สูงมากในบริเวณ CGHAZ สำหรับ HI 5.0 kJ / mm เมื่อเปรียบเทียบกับความร้อนอื่น ๆ ค่า PAGS ที่สังเกตได้คือ 86 μm , 99 μm , และ 102 μm สำหรับ HI 1.5, 2.2, 5.0 kJ / mm ตามลำดับ มีระยะห่าง PAGS ของโลหะฐานเพียง 7 μm เท่านั้น

- โครงสร้างจุลภาคในตัวอย่างรอยเชื่อมบริเวณ CGHAZ จะถูกเปลี่ยนจากระแนงไบไนท์และโครงสร้างมาเทนไซต์จากการอบคืนตัว (โลหะฐาน) ไปเป็นส่วนผสมของไบไนติก เฟอร์ไรต์ ทราย เกรนแบนไนต์และโครงสร้างมาเทนไซต์จากการอบคืนตัว ความกว้างของระแนง bainitic ferrite นั้นเพิ่มขึ้นตามค่า HI ที่เพิ่มขึ้นจาก 0.29 เป็น 0.46 μm

- ผลกระทบต่อความเหนียวของ CGHAZ สำหรับ HIs ที่แตกต่างกันลดลงอย่างมากจากโลหะฐาน เนื่องจากการก่อตัว PAGS ขนาดใหญ่ (86 μm - 102 μm) เพิ่มความกว้างของขนาดของระแนง bainitic ferrite เพิ่มปริมาณของ M-A ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงในพลังงานถึง (83 - 46 J) ลดลงเมื่อเพิ่มค่าใน HIs อย่างไรก็ตามพลังงานขั้นต่ำที่ต่ำกว่านั้นมีอุณหภูมิการทดสอบต่ำสุดคงที่มากขึ้นหรือน้อยลง (196 °C)

- การวิเคราะห์ผิวหน้าแตกหักของชิ้นงานโลหะฐานแสดงถึงความเหนียวเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ -75°C จากนั้นตามด้วยการทดสอบแบบผสม (-75°C ถึง -110°C) จนถึงสภาพที่ทำให้เปราะเต็มรูปแบบ (-110 ถึง -196°C) กรณีของชิ้นงานจำลองรอยเชื่อมทั้งสามความร้อนอินพุตเพื่อวิเคราะห์ผิวหน้าแตกหักนั้นมีความเปราะในทุกอุณหภูมิการทดสอบทั้งหมด

- อุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงจากเหนียวไปสู่แบบเปราะ (DBTT) สำหรับโลหะฐานและตัวอย่างชิ้นงานเชื่อมสำหรับการป้องกันความร้อนเป็น 1.5, 2.2, 5.0 kJ / mm กำหนดให้เป็น -93°C, -90°C, -81°C, -79°C, ตามลำดับ ภายใต้พลังงานสูงกว่าและต่ำกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงลักษณะการแตกหักที่อิงจาก เครื่องวิเคราะห์ผิวหน้าแตกหัก นั้นมีค่าเป็น -90°C สำหรับโลหะฐานเท่านั้นที่อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงลักษณะการแตกหักจะทำได้

Bevis Hutchinson , Jacek Komenda , Gregory S. Rohrer , Hossein Beladi. (2015) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติการกระแทกแบบชาร์ปีของวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูงสองชนิดด้วยการทำกระบวนการทางความร้อน เพื่อที่จะจำลองผลกระทบของรอยเชื่อม (HAZ) กระบวนการทางความร้อนที่ใช้ที่นี่ คือการให้ความร้อนอินพุตด้วยการระบายความร้อนจาก 800 ถึง 500 องศาเซลเซียส วัสดุฐาน (BM) เป็นคาร์บอนต่ำแผ่นเหล็กโครงสร้างเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูงที่มีส่วนประกอบของวานาเดียมและไนโตรเจน (V - N) และไนโอเบียม (Nb) ตามลำดับ ความแข็งแรงแบบเหนียวของบริเวณ HAZs แสดงพฤติกรรมที่แตกต่างที่แสดงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สำหรับเหล็ก V-N คือ ความเหนียวได้รับการปรับปรุงให้เพิ่มขึ้นด้วยการระบายความร้อนที่รวดเร็วยิ่งขึ้น (สภาวะความเย็นต่ำ) ในขณะที่เหล็ก Nb มีพฤติกรรมในทางตรงกันข้าม พฤติกรรมบางอย่างนี้สามารถอธิบายได้จากการมีเกรนเฟอร์ไรต์ทรายในเหล็กกล้า V-N ที่เย็นลงอย่างช้าๆ อย่างไรก็ตามเงื่อนไขที่โครงสร้างทั้งหมดที่

เป็น bainitic และค่อนข้างจะคล้ายกันในภาพถ่ายโครงสร้างของวัสดุในระดับจุลภาคจะให้ความเห็นียวที่แตกต่างกัน วิธีการที่พัฒนาขึ้นนี้วิเคราะห์ค่าขอบเขตของชิ้นงาน ด้วยเงื่อนไข 5 ค่า เครื่องมือหลักที่ใช้คือการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอน backscattering ถูกนำไปใช้กับกรณีเหล่านี้เป็นครั้งแรก เริ่มต้น ผลที่ออกมาแสดงให้เห็นว่าบริเวณใน lath bainite ส่วนใหญ่อยู่ในระนาบของเฟอไรต์ และค่าเฉลี่ยระยะห่างของบริเวณเหล่านี้แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเหล็กและอัตราการเย็นตัว ตั้งแต่ยังเป็นระนาบจนถึงในเฟอไรต์ และระยะห่างเฉลี่ยที่ใกล้ระหว่างบริเวณ lath bainite มีความเป็นพลาสติกที่ความเข้มข้นของความเครียดทำให้เป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหัก ความแตกต่างระหว่างเหล็กทั้งสองชนิดเชื่อว่าเป็นผลมาจากพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของเหล็กในการหล่อเย็นเมื่อมีการตกตะกอนอานาเดียม ไนไตรต์ในออสเทนไนต์เร่งการก่อตัวของเฟอไรต์และการเพิ่มอุณหภูมิของเฟสการเปลี่ยนแปลงในเหล็ก V-N

Veronica G. Haugen, Bjørn Rune Sørås Rogne, Odd M. Akselsen, Christian Thaulow, Erling Østby (2013) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเหล็กที่นำมาใช้ในสภาพอากาศบริเวณแถบอาร์กติกที่อาจมีอุณหภูมิต่ำเปลี่ยนไปเป็นสูง เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจึงมีผลต่อความเหนียวและเปราะ ทำให้การแตกหักมีสภาพแตกต่างกันออกไป การแตกหักของเหล็กจะต้องได้รับการปรับปรุง โดยเฉพาะหลังจากการเชื่อมโลหะ ในการทำนายพฤติกรรมของพวกเหล็ก จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติภายใน ดังนั้นการศึกษาในปัจจุบันจึงมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการทดสอบคุณสมบัติทางกลแบบนาโนของโครงสร้างจุลภาคทั่วไปที่มีการให้ความร้อนซ้ำในเกรนย่อยบริเวณผลกระทบของรอยเชื่อมของเหล็กตีอัด 490 MPa โครงสร้างจุลภาคดังกล่าวเกิดจากการเชื่อมด้วยความร้อนของตัวอย่างชิ้นงานหน้าตัดขนาด 11 mm x 11 mm และมีความยาว 100 mm. โดยใช้อุณหภูมิสูงสุด 1350 °C ในรอบแรก และ 780 °C ในรอบที่สอง รอบทั้งสองใช้เวลาทำความเย็น $\Delta t_{(8/5)}$ จาก 5 หรือ 10 s สิ่งนี้ทำให้เกิดการก่อตัวของเฟส M-A ตามแนวรอยต่อของเกรนออสเทนไนต์และการรวมของ bainite / martensite ขนาดใหญ่ การทดสอบ Nanomechanical Testing กระทำโดยการบีบอัด nanopillars จัดเตรียมในบริเวณขอบของเกรนที่เป็นบริเวณที่ตั้งอยู่ของ M-A จำนวนมาก ผลที่ได้รับแสดงให้เห็นอย่างมีนัยสำคัญว่าบริเวณขอบของเกรนมีความแข็งแรงสูงกว่าที่เป็นกลุ่มเกรน นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่ามีมีการกระจายขนาดใหญ่ในข้อมูลความเค้นความเครียดขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาคของบริเวณที่กำลังถูกทดสอบ ในงานวิจัยนี้ได้มีการสรุปเพิ่มเติมว่า

ในการตรวจสอบปัจจุบันการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็ก F70 ดำเนินการโดยใช้ตัวอย่างการจำลองการเชื่อมความร้อน ข้อสรุปดังต่อไปนี้ :

- การทดสอบการกดเพื่อหาคุณสมบัติทางกลแบบนาโนของ เสาขนาดเล็กมีความแข็งแรงของความแข็งแรงคราก (yield strength) ของชิ้นงานสูงเมื่อเสาดั้งอยู่ที่บริเวณก่อนขอบเขตของออสเทนไนต์ที่มีบล็อก MA เป็นส่วนประกอบ

- สำหรับเสาดั้งที่อยู่ในภายในของเกรนมีความแข็งแรงของความแข็งแรงคราก (yield strength) ค่อนข้างต่ำกว่าที่ดั่งอยู่ที่บริเวณของเกรนทั่วไปภายในช่วงจาก 500 ถึง 600 MPa

- พบการกระจายตัวขนาดใหญ่ที่การระบายความร้อนอย่างรวดเร็ว ($\Delta t_{(8/5)}$ ที่ 5 s) ผลการกระจายอาจเกี่ยวข้องกับผลการเลือกการสุ่มตัวอย่างและแตกต่างกัน การวางแผนผลึก

- ขนาดเสาดั้งมีอิทธิพลต่อความเค้น-ความเครียดที่เพิ่มขึ้นอย่างมากในความแข็งแรงเมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาลดลงจาก 1 เป็น 0.25 μm

Mohammad Saadati, Amir Keyvan Edalat Nobarzad, Mohammad Jahazi, (2019) การวิจัยนี้เป็นการศึกษารอยแตกร้าวขณะร้อนในรอยเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงมาตรฐาน ASTM A572 เกรด 50 และ ASTM A656 เกรด 80 ในบริเวณเส้นแบ่งกึ่งกลาง ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบ GMAW ซึ่งรอยแตกร้าวนี้สามารถพบเห็นได้ถ้าการควบคุมตัวแปรในการเชื่อมยังไม่ดีพอ ในงานวิจัยนี้ เริ่มต้นจากการศึกษาส่วนประกอบและขนาดเกรนของโลหะฐานรวมถึงอัตราส่วนของ Ni/Cu ในลวดเชื่อม การเชื่อมใช้วิธีการเชื่อมต่อแบบ T-type ที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมขนส่งและการก่อสร้าง การทดลองการเชื่อมและรอยเชื่อมนั้นใช้วิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ confocal การตรวจสอบใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนรวมถึงสสารเคมี (EDS) และการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนแบบกระจาย (EBSD) การเจริญเติบโตแบบ Epitaxial ถูกระบุเป็นรูปแบบการแข็งตัวที่เพิ่มขึ้นตามผลการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์และพร้อมกันกับ sigma-ferrite ในบริเวณผลกระทบรอยเชื่อมและรอยเชื่อม ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าเมื่อไม่ได้คำถึงถึงส่วนประกอบที่สำคัญในลวดเชื่อม การแตกร้าวขณะร้อนเกิดขึ้นที่เส้นแบ่งของรอยเชื่อม เป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนของโลหะฐานกับการพัฒนาและการเชื่อมประสานของด้านข้างของเดนไดรต์หลักและรอง จลนพลศาสตร์การเจริญเติบโตของขนาดเกรนของโลหะฐานในบริเวณผลกระทบของรอยเชื่อม (HAZ) มีความสัมพันธ์กับเสถียรภาพทางความร้อนของไมโครอัลลอยด์คาร์ไบด์และไนไตรด์ จากการตรวจสอบพบว่าไม่มีความสัมพันธ์ที่เฉพาะเจาะจงระหว่างส่วนผสมของ Ni ของโลหะลวดเชื่อมต่อการแตกร้อนที่เส้นกึ่งกลางฟิลเลอร์สำหรับการทดลองนี้

Rishi Pamnani., T. Tayakumarb, M. Vasudevanb, T. Sakthivelb, (2016) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบความแข็งแรงของบริเวณรอยเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูงหรือเหล็กไมโครอัลลอยด์ ที่ทำโดยกระบวนการเชื่อมอาร์คแบบต่างๆคือ SMAW, SAW, FCAW

และ A-GTAW ผลกระทบของลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของที่ได้ทำการศึกษาความแข็งแรงของโลหะเชื่อม ขนาดรวมส่วนของพื้นที่และความหนาแน่นของจำนวนวิเคราะห์โดยใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์รูปภาพ ส่วนหนึ่งของพื้นที่และจำนวนของการรวมกันต่อพื้นที่ (mm^2) พบว่าการรวมกันสูงสุดในการเชื่อมแบบ SAW ตามด้วย FCAW, A-GTAW และ SMAW การวิจัยนี้ได้ถูกตั้งข้อสังเกตว่าขนาดโดยละเอียดรวมและส่วนประกอบการรวมที่ต่ำกว่าสามารถเชื่อมโยงกับความแข็งแรงต่อแรงกระทำที่สูงขึ้นของรอยเชื่อมที่อุณหภูมิห้อง ที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์ผลกระทบความเหนียวของโลหะของการเชื่อมอาร์คแบบต่างๆ ที่รอยต่อ ถูกพบว่าได้รับอิทธิพลจากขนาดเกรนของโลหะเชื่อมตามองค์ประกอบทางเคมีของรอยเชื่อมโลหะและการรวมกันของอซิคูล่าเฟอร์ไรต์ ผลของการส่องภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ของบริเวณขึ้นงานโลหะและรอยเชื่อมของเทคนิคการเชื่อมที่แตกต่างกัน การรวมในบริเวณโลหะขึ้นงานนั้นต่ำกว่าที่เห็นได้ชัดเจนในรอยเชื่อม การรวมในรอยเชื่อมพบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมากกับเทคนิคการเชื่อม การกระจายของการรวมในรอยเชื่อมเป็นชุดในการเชื่อมทั้งหมดที่ใช้ยกเว้นว่ารอยเชื่อมแบบ SAW แสดงจำนวนของการรวมและพฤติกรรมการรวมตัวกันมากขึ้น ขนาดการรวมส่วนของพื้นที่และความหนาแน่นของตัวเลขได้ถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้ซอฟต์แวร์การวิเคราะห์ภาพ (Image J) และผลสรุปที่ได้สัดส่วนพื้นที่ของการรวมพิจารณาว่า 100 mm^2 ของพื้นที่รอยเชื่อมและจำนวนของการรวม พื้นที่ (mm^2) การรวมพื้นที่สูงสุดเกิดขึ้นในการเชื่อมแบบ SAW ตามด้วย FCAW, A-GTAW และ SMAW

Seok Gyu Lee, Seok Su Sohn, Bohee Kim, Woo Gyeom Kim, Kyung-Keun Umb, Sunghak Lee, (2017) ทำการศึกษาความไวในการแตกของ Martensite-austenite (MA) ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนระหว่างวิกฤติ (ICHAZ) แตกต่างกับคุณสมบัติของเมทริกซ์ที่อยู่ติดกัน, การศึกษานี้มาจากการตั้งคำถามว่าความแข็งแรงของ MA, และ MA /matrix ลักษณะการประสาน แต่เหตุผลใด MAs จึงใช้ไม่ได้ที่รอยต่อหน้าสัมผัส MA / เมทริกซ์ หรืออาจแตกเองที่ ผลของคุณสมบัติทางโครงสร้างจุลภาครวมถึง MA และเมทริกซ์ประกอบด้วยเม็ด bainite (GB) และ quasi-polygonal ferrite (QPF) มีผลต่อการเริ่มต้นของรอยแตกและพฤติกรรมการกระจายตัว ซึ่งส่งผลกระทบต่อ critical crack tip opening displacement (CTOD) ซึ่งกระบวนการนี้ถูกตรวจสอบในการศึกษานี้ด้วย ในบริเวณ ICHAZ ส่วนใหญ่ประกอบด้วย GB (75.2 vol%) และ QPF (19.5 vol%) พร้อมด้วย 5.3 vol% ของ MA พื้นที่ QPF ถูกเปลี่ยนรูปมากกว่าพื้นที่ GB Nanoindentation ด้วยผลการทดสอบการดัดสามจุด ข้อมูลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของ MA ขึ้นอยู่กับลักษณะขอบเขตของเมทริกซ์ใกล้เคียงเช่น QPF มีขอบเขตมุมสูงและ GB มีขอบเขตมุมต่ำ ตามการวิเคราะห์รายละเอียดเกี่ยวกับส่วนต่อหน้าสัมผัสของ MA

/ QPF โดยใช้อะตอมโพรบ ปริมาณของอะตอม C, Mn, Mo, Ni และ Cr ถูกแยกที่หน้าสัมผัสของ MA / QPF ในขณะที่อะตอมของ Si, Cu, Al และ P ถูกแยกออกได้ยาก ผลลัพธ์เหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า องค์ประกอบการผสมอัลลอยด์ที่สำคัญ (C, Mn, Ni และ Cr) ถูกแยกออกที่หน้าสัมผัสของ MA / QPF ซึ่งมีผลต่อการเสื่อมสภาพวิกฤต CTOD โดยการลดพันธะอิสระเฉลี่ยสำหรับการเริ่มต้น แตกร้าวและการแพร่กระจาย

ในการศึกษาปัจจุบันผลกระทบขององค์ประกอบ martensite-austenite (MA) จากการเริ่มเกิดรอยแตกและการขยายตัวในบริเวณที่มีผลกระทบต่อความร้อน (ICHAZ) ของเหล็กผสมต่ำความแข็งแรงสูง (HSLA) ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคและการแตกหักอย่างละเอียด

Seok Gyu Lee, Dong Ho Lee, Seok Su Sohn, Woo Gyeom Kim, Kyung-Keun Um, Ki-Seok Kim, Sunghak Lee, (2017) ได้ศึกษาทำความเข้าใจและปรับปรุงความทนทานต่อการแตกหักของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZs) ของเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง(HSLA) เกรด S500 หรือ S550 หนา 80 มม. เหล็กโครงสร้างจุลภาคที่ซับซ้อนรวมถึง quasi-polygonal ferrite (QPF) , acicular ferrite (AF) , granular bainite (GB) , bainitic ferrite (BF), และ martensite-austenite (MA) เพื่อหาความสัมพันธ์กับ critical crack tip opening displacement (CTOD) ในการศึกษาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ประสบความสำเร็จในการจำแนกและกำหนดปริมาณของโครงสร้างจุลภาคใน HAZs ของเหล็ก HSLA สามตัว HAZ แบบหยาบ (CGHAZ) ประกอบด้วย AF, GB และ BF พร้อมกับ MA จำนวนเล็กน้อย ในขณะที่บริเวณกระทบร้อนระหว่างวิกฤติ (ICHAZ) ประกอบด้วย QPF, GB และ MA ในชิ้นงานแบบ CGHAZ นั้นการเพิ่ม Ni ช่วยในการก่อตัวของ AF ในขณะที่ป้องกันการก่อตัวของ GB และผลของการเพิ่มปริมาณของ Ni ทำให้เกิด CTOD ที่สำคัญมาก ใน CGHAZ ทั้ง Ni และ Mn ส่งเสริมการสร้าง AF และป้องกันการก่อตัวของ GB ในขณะที่ Ni นั้นมีประสิทธิภาพมากกว่า Mn ดังนั้นการเพิ่ม Ni จึงส่งผลให้ CTOD ที่สำคัญสูงมาก ใน ICHAZ ทั้ง Ni และ Mn ส่งเสริมการก่อ MA อย่างไรก็ดีตามในเหล็กที่มีส่วนผสมของนิกเกิลสูงจะมี MA จำนวนหนึ่งถูกทำให้หนาแน่นตามแถบ Ni ที่แยกจากกัน สิ่งนี้มีบทบาทสำคัญในการลดเส้นทางค่าเฉลี่ยอิสระสำหรับการรวมตัวกันของช่องว่างและการแพร่กระจายของรอยแตกซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพอย่างรุนแรงได้อย่างง่ายดายของ CTOD ที่สำคัญ

ในการศึกษาครั้งนี้ผลของการเติม Ni และ Mn ต่อการเชื่อมแบบจำลองโครงสร้างจุลภาค HAZ และคุณสมบัติ CTOD ของเหล็กกล้า HSLA ทั้ง 3 ชนิด โดยวิเคราะห์เหล็กและอธิบายความสัมพันธ์โดยการตรวจสอบลักษณะการแตกหัก

(1) CGHAZ ประกอบด้วย AF, GB และ BF พร้อมกับปริมาณส่วนผสมของของ MA เล็กน้อย อัตราส่วนเชิงปริมาตรของ AF มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นในเหล็ก HM และ HN มากกว่าเหล็ก T ในขณะที่ปริมาณเศษส่วนของ GB ลดลง ทั้ง Mn และ Ni มีบทบาทในการสนับสนุนการก่อตัวของ AF และในการป้องกันการก่อตัวของ GB ในขณะที่ Ni มีประสิทธิภาพมากกว่า Mn

(2) โครงสร้างจุลภาคของ ICHAZ ประกอบด้วย QPF, GB และ MA ส่วนปริมาณของ QPF และ GB สูงสุดในเหล็ก HN และ T ตามลำดับ อัตราส่วนเชิงปริมาตรของ MA นั้นสูงขึ้นมากร ICHAZ กว่าใน CGHAZ และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นในเหล็ก T, HM และ HN เมื่อปริมาณ Ni สูงจึงถูกแยกออกไปตามทิศทางการหมุน ดังนั้นการสร้างแถบแยกของ Ni แบบหยาบ ทำให้ MAs ก่อตัวได้อย่างต่อเนื่อง

(3) เมื่อพิจารณาการเพิ่ม Mn หรือ Ni ด้วย CTOD ที่สำคัญ ค่าของ HAZs เกิดขึ้นพร้อมกัน ธาตุ Ni ส่งเสริมการก่อตัวของ AF ใน CGHAZ ในขณะที่มันป้องกันการก่อตัวของ GB และผลลัพธ์ของการเพิ่มของ Ni ส่งผลให้ค่า CTOD ที่สำคัญสูงมาก (0.30 มม.) อย่างไรก็ตาม Ni จะช่วยลด CTOD วิถีถึงเหลือ 0.22 มม. ใน ICHAZ เพราะมันส่งเสริมการพัฒนาของ MA ดังนั้นการควบคุมอย่างระมัดระวังของ Ni ยังจำเป็นสำหรับการควบคุมการก่อตัวของ MA

(4) ใน CGHAZ ที่อัตราส่วนเชิงปริมาตรของ MA นั้นคล้ายคลึงกันในเหล็กสามชนิด, เกรนหยาบของ GB ด้านหน้าของรอยแตก fatigued pre-crack tip ให้เกิดการเสียรูปทรงแบบพลาสติกขนาดเล็ก รวดเร็วและเป็นเชิงเส้นด้วยการขยายรอยแตกที่มีความต้านทานต่อการแตกหักเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเกรนละเอียด AF ที่มีขอบเขตกว้างมุมสูง นำไปสู่การเสียรูปทรงที่บริเวณปลายรอยแตก ดังนั้นเส้นทางการแตกร้าวมักมีทิศทางการแผ่แบบคดเคี้ยวในรูปแบบซิกแซก ซึ่งเป็นรอยแตกที่มักจะเบี่ยงเบนไปที่เกรน AF ที่ละเอียดและเกรน AF ที่มีความผิดปกติสูง

(5) ในเหล็ก HN ปริมาณ Ni สูงทำให้เกิดการแยกแถบของ Ni และ Mn ขณะที่แนวโน้มการแยกตัวของ Ni และ Mn นั้นมีขนาดเล็กในเหล็ก HM โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน ICHAZ ของเหล็ก HN จำนวนของ MA มีความหนาแน่นสูงขึ้นตามแถบของ Ni-segregated bands สิ่งนี้มีบทบาทสำคัญต่อการลดช่องว่างเฉลี่ยสำหรับการรวมตัวกันของช่องว่างและรอยแตกการขยายตัวซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพอย่างรุนแรงวิกฤตของ CTOD

A Grong, Lin ZHAO, Chuan PAN, Zhi ling TIAN , (2 0 1 5) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของธาตุไทเทเนียม (Ti) ที่มีอยู่ในลวดเชื่อมเหล็กไมโครอัลลอยด์ ชนิด ABS EH16 เป็นเหล็กแผ่นขนาด 800x200x20 มม โดยการทดลองวิจัยนี้เป็นการเชื่อมเหล็กไมโครอัลลอยด์ด้วยการให้ความร้อนในปริมาณมากในระหว่างการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมที่สามารถปรับปริมาณของธาตุไทเทเนียมได้เป็นลวดเชื่อมระดับ AWS EG70TG ใช้แรงเคลื่อน 34V 340A เชื่อมที่ความเร็ว 7.8 cm./min หาความร้อนที่ได้จากการเชื่อมเท่ากับ 8.5 kJ/mm จากผลการทดสอบพบว่า ในปริมาณไทเทเนียมปานกลางตั้งแต่ร้อยละ 0.028-0.038 มีผลทำให้ขนาดของเกรนในเนื้อโลหะเชื่อมละเอียดขึ้น ทำให้การเกิด bainite ในบริเวณรอยเชื่อมมีปริมาณสูง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของธาตุไทเทเนียมปริมาณของ eutectoid ferrite กลับมีปริมาณลดลง ในขณะที่ส่วนประกอบของ bainite และ M-A ลดลง ชนิดของธาตุที่มีการรวมกันในรอยเชื่อมจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจาก Mn-Si-Al-O ไปสู่ Ti-Mn-Al-O สุดท้ายได้ออกมาเป็น Ti-Ai-O ที่สภาวะนี้ปริมาณของธาตุไทเทเนียมเพิ่มขึ้นจาก 0 ไปจนถึงร้อยละ 0.064 สำหรับการเพิ่มปริมาณธาตุไทเทเนียมในปริมาณสูงที่ร้อยละ 0.028-0.038 ให้ความเหนียวของรอยเชื่อมมีค่ามากขึ้น เมื่อการรวมตัวกันของ Ti_2O_3 มีความหนาแน่นน้อยกว่า 2 ไมโครเมตร มีผลทำให้ประสิทธิภาพของการรวมตัวนิวเคลียสของ acicular ferrite ดีขึ้น อย่างไรก็ตามการที่ปริมาณของธาตุไทเทเนียมสูงกว่าค่าที่ดีที่สุดในช่วงร้อยละ 0.028-0.038 ความเหนียวของรอยเชื่อมมีค่าลดลง ส่วนความแข็งแรงของรอยเชื่อมและคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อม ก็มีค่าที่ดีที่สุดในช่วงเดียวกัน

Xiao-wei Chen, Gui-ying Qiao, Xiu-lin Han, Xu Wanga, Fu-ren Xiao, Bo Liao , (2013) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกลบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ของเหล็กไมโครอัลลอยด์ X80 ทั่วไปสามตัวที่มีส่วนประกอบต่างกัน โดยได้ใช้ชิ้นงานเหล็กแผ่นสามชิ้นที่มีส่วนประกอบหลักคือ Mn-Cr-Nb ในปริมาณที่แตกต่างกัน ชิ้นงานถูกตัดให้มีขนาด 10x10x80 มม สำหรับการจำลองเพื่อหา บริเวณผลกระทบของการเชื่อม(HAZ) อีกส่วนหนึ่งทำการศึกษาโดยใช้วิธีการจำลองการเชื่อมด้วยความร้อนในเครื่องจำลองความร้อน Gleeble-3500 ผลการวิจัยพบว่าองค์ประกอบทางเคมีและพารามิเตอร์กระบวนการเชื่อมมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติของ HAZ ด้วยการเพิ่มขึ้นของอัตราการทำความเย็นปริมาณของโครงสร้างจุลภาคที่ถูกเปลี่ยนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะเพิ่มขึ้นและโครงสร้างทางจุลภาคจะดีขึ้น นอกจากนี้ความแข็งแรงและความทนทานของ HAZ ยังแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ภายในช่วงอุณหภูมิสูงที่สุดจาก 600 ถึง 1,350 ° C มีสองโซนที่เปราะและหนึ่งจุดอ่อนแรงที่สำคัญใน HAZ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเหล็ก Cr-Nb ที่มีปริมาณสูง ทำให้บริเวณของ HAZ นั้นเปราะมาก

ผลกระทบขององค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญเช่น Mo, Cr และ Nb ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของ HAZ ได้มีการอภิปรายต่อว่า ถึงแม้ว่าระบบโลหะผสมทั้งสามในงานนี้จะมีความสามารถในการเชื่อมได้ดี แต่ Mn – Mo – Nb หรือ Mn – Cr – Mo – Nb นั้นแสดงให้เห็นถึงการผสมผสานระหว่างความแข็งแรงและความทนทานของ HAZ เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้า Mn – Cr – Nb ดังนั้น สำหรับเหล็กที่มี Nb สูงจำเป็นต้องเพิ่ม Mo อย่างเหมาะสมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของ HAZ

บทสรุปเพิ่มเติมอย่างละเอียด เหล็กกล้า X80 สามประเภททั่วไป ได้แก่ Mn – Cr – Nb , Mn – Mo – Nb และ Mn – Cr – Mo – Nb และผลกระทบขององค์ประกอบหลักของโลหะผสมคือ Mo, Cr และ Nb บนโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของ HAZ ถูกตรวจสอบกรณีดังต่อไปนี้ในงานวิจัยนี้ได้มีการสรุปเพิ่มเติมว่า

- แม้ว่ากระบวนการทำความเย็นของรอยเชื่อม CCT ไดอะแกรมและวัฏจักรความร้อนของการเชื่อมมีความแตกต่างบางอย่างและความแตกต่างมีอยู่ในค่าของคุณสมบัติเชิงกลในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางกลด้วย องค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันของเหล็กและการแสดงผลอัตราการระบายความร้อนการเปรียบเทียบที่แข็งแรง ดังนั้นการเชื่อม CCT ไดอะแกรมสามารถใช้ในการประเมินโครงสร้างจุลภาคและเชิงกลคุณสมบัติของ HAZ

- โลหะผสมต่ำความแข็งแรงสูงทั้งสามในงานนี้แสดงการเชื่อมได้ดีโซนเปราะจะปรากฏใน sub-HAZs ของจุดสูงสุดโดยอุณหภูมิประมาณ 750 °C และ 1,650 °C ตามลำดับขณะที่เป็นความร้อนอินพุต 4.0 kJ / mm และอัตราการระบายความร้อนมากกว่า 5 °C / s พลังงานกระแทกแบบ Charpy ส่งผลกระทบต่อบริเวณของ CGHAZ มากกว่า 100 J. เหตุผลของความเปราะของ CGHAZ มาจาก austenite เกรนหยาบและไบไนต์ เหตุผลของการเปราะของ sub-HAZs ของอุณหภูมิสูงสุดที่ประมาณ 750 °C มีสาเหตุมาจากขนาดใหญ่และปริมาณขององค์ประกอบมาเทนไซด์และออกสเทนไนต์ตามแนวบริเวณออกสเทนไนต์ก่อนหน้า ในทางตรงกันข้ามบริเวณที่มีกำลังเปราะลงจะปรากฏใน sub-HAZs ของอุณหภูมิสูงสุดจาก 900 ถึง 1,000 °C และด้วยการเพิ่มขึ้นของความร้อนหรือการลดลงของอัตราการระบายความร้อน ความแข็งแรงลดลงเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน 555 MPa ในงานวิจัยนี้ได้มีการสรุปเพิ่มเติมว่า

- การเพิ่ม Mo ในเหล็กกล้าเกรดสูง N80 X80 มีมากขึ้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพให้มีความทนทานและความแข็งแรงของ HAZ มากกว่าการเพิ่มของ Cr ซึ่งในการเพิ่มที่ซับซ้อนของ Cr และ Mo เป็นการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพอย่างมากเพื่อเพิ่มความเหนียวและความแข็งแรงของ HAZ

- สำหรับเหล็กที่มีค่า Nb สูง Nb ในสารละลายสามารถทำให้ยับยั้งการเปลี่ยนแปลงของ PF และ QF และลดการแปลงเฟสของอุณหภูมิในขณะที่ Nb ในการตะกอนสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเกรนอสเทนในต้นก่อนปรับปรุงให้มีความแข็งแรงที่บริเวณ CGHAZ มากขึ้น อย่างไรก็ตาม Nb ที่ยังไม่ละลายในตะกอนจะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนแปลงเฟสอุณหภูมิและทำให้โครงสร้างจุลภาคที่ถูกแปลงสภาพให้หายากทำให้ลดความเหนียวและความแข็งแรง ดังนั้น สำหรับเหล็กที่มีค่า Nb สูงจำเป็นต้องพิจารณาต่อไปประสิทธิภาพผลของ Nb และเพิ่ม Cr และ Mo ในเหล็กกล้าให้เหมาะสมเพื่อปรับปรุงความทนทานและความแข็งแรงของ HAZ ให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

Y.Q. Zhanga, H.Q. Zhanga, W.M. Liua, H. Houb, (2007) การวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของการเย็นตัวที่มีผลต่อเกรนของเหล็กกล้าไมโครอัลลอยด์ความต้านทานความเค้นประลัย 650 MPa เหล็กกล้านี้เป็นเหล็กที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนคือ ให้ความร้อนช้าแล้วนำมาชุบและอบคืนตัวหลังจากผ่านการรีด ตัดชิ้นงานเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ยาว 55 mm. จากการทดสอบการเย็นตัว ไดอะแกรมการเปลี่ยนแปลงการระบายความร้อนอย่างต่อเนื่องของโซนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและโครงสร้างจุลภาค หลังจากการระบายความร้อนอย่างต่อเนื่องถูกตรวจสอบสำหรับเหล็กที่มีและไม่มีไนโอเบียม ผลการตรวจสอบสำหรับเหล็กที่ไม่มี Nb, เฟอไรต์ในขอบเขตของเกรน, ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของ pearlite และอซิคูลาร์เฟอไรต์ถูกผลิตขึ้นในอัตราการทำความเย็นที่ช้าลง เฟส Bainite เกิดขึ้นที่อัตราการเย็นตัวเร็วขึ้นอย่างไรก็ตามสำหรับเหล็กที่มี Nb นั้นจะมีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ ในอัตราการทำความเย็นที่หลากหลาย ที่เวลาเย็นลงอัตรา 32 K/s อุณหภูมิเริ่มต้นการเปลี่ยนแปลงจะลดลง 20K โดยประมาณในเหล็กกล้าที่มี Nb เปรียบเทียบกับที่ไม่มี Nb เฟอไรต์นิวคลิเอชันที่บริเวณรอยต่อของเม็ดอสเทนไนต์ก่อนหน้าที่ถูกหยุดการเกิดและบริเวณอัตราการเย็นตัวสำหรับการแปลงไปไนต์แบบละเอียดนั้นกว้างขึ้น ที่อัตราการเย็นตัว > $32\text{ K/s}</math> การเติม Nb นั้นไม่มีผลต่ออุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน แต่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ พบว่า Martensite ในเหล็กกล้าที่มี Nb มีอัตราการเย็นตัวเร็วขึ้น แต่ไม่มีเกิดขึ้นในเหล็กที่ไม่มี Nb$

S. RAGU NATHAN , V. BALASUBRAMANIAN , S. MALARVIZHI , A.G. RAO, (2015) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของกระบวนการเชื่อมเพื่อหาคุณสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไมโครอัลลอยด์ในงานวิศวกรรมทางทะเล โดยขึ้นทดสอบเป็นเหล็กเกรดทางทะเลที่ผ่านกระบวนการรีดหนา 5 mm ตัดกว้างยาว 100x150 mm กระบวนการเชื่อมนี้ใช้

กระบวนการแบบ FSW, GMAW และ GMA โลหะผสมที่มีความแข็งแรงสูงสำหรับเรือ (HSLA) สามารถเชื่อมได้อย่างง่ายดายโดยกระบวนการเชื่อมฟิวชั่นทุกประเภท อย่างไรก็ตามการเชื่อมฟิวชั่นของเหล็กเหล่านี้นำไปสู่ปัญหาต่าง ๆ เช่นการแตกร้าวเย็นความเครียดที่เหลือ การบิดเบี้ยวและความเสียหายจากความล้า ปัญหาเหล่านี้สามารถถูกกำจัดได้โดยกระบวนการเชื่อมโซลิดสเตตเช่นการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (FSW) ในการตรวจสอบนี้การประเมินเปรียบเทียบเชิงกล (แรงดึงแรงกระแทกความแข็ง) คุณสมบัติและคุณสมบัติทางโครงสร้างจุลภาคของอาร์คโลหะที่มีฉนวนหุ้ม (SMA), อาร์คโลหะแก๊ส (GMA) และการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (FSW) เกรดทางทะเล ข้อต่อเหล็ก HSLA ถูกตรวจสอบเพื่อหาความเหมาะสม พบว่าการใช้กระบวนการ FSW กำจัดปัญหาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมฟิวชั่นและส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลทางด้านความเหนียวที่เหนือกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้อต่อแบบเชื่อม GMA และ SMA

WANG Xiao-nan , DI Hong-shuang, ZHANG Chi, DU Lin-xiu, DONG Xue-xin. (2012) การวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการเชื่อมได้ของ เหล็กกล้าไมโครอัลลอยด์เกรดความแข็งแรงประลัยที่ 780 MPa วัสดุนี้แบ่งออกเป็นสองชุดคือชุดของ DOMEX700MC และ BS700MC โดยส่วนประกอบทางเคมีต่างกันเล็กน้อย การศึกษามุ่งเน้นไปที่การเชื่อมปกคลุมด้วยก๊าซ CO₂ การทดสอบการเชื่อมแบบเชื่อมด้วย CO₂ เป็นการพัฒนาขึ้นมาใหม่ สำหรับรถบรรทุกสำหรับงานหนักที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใหม่ขนาด 780 MPa ซึ่งเป็นเหล็กใช้ทำคาน, การศึกษานี้นำไปสู่การหาโครงสร้างจุลภาค, ความแข็งแบบไมโคร, คุณสมบัติเชิงกล, และความทนทานต่อแรงกระแทกของรอยเชื่อม วิวัฒนาการของโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเกิดขึ้นดังนี้ เชื่อมตะเข็บ (เฟอไรต์ acicular + proeutectoid เฟอไรต์) - โซนฟิวชั่น (แถบเม็ดยาวของ bainite M / A) - เกรนโซนหยาบ (แถบยาว bainite เม็ดหรือแถบสั้น M / A) - โซนเม็ดละเอียด (เฟอไรต์ + pearlite blocky M /) - โซนเม็ดเล็กผสม (เฟอไรต์ + เม็ดไปไนต์ + บล็อกเอ็ม / เอไอ) - โลหะฐาน (proeutectoid ferrite granular bainite blocky หรือเกาะ M / A แบบละเอียด) การเพิ่มความหนาแน่นของขอบเขตของเม็ดเกรนสามารถปรับปรุงเพื่อเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกได้อย่างมีประสิทธิภาพและบล็อก M / A แบบเกาะกลุ่มที่เป็นอุปสรรคขัดขวางการแพร่กระจายของรอยร้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าแถบยาวของ M / A เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดใหม่ที่มีความแข็งแรงสูง 780 MPa มีความสามารถในการเชื่อมได้ดี เทคโนโลยีการเชื่อมคือใช้ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้: แรงดันไฟฟ้าเชื่อม 20 ถึง 21 V, กระแสเชื่อมเท่ากับ 200 ถึง 210 A, และอัตราการไหลของก๊าซคลุมคือ 25 ลิตร / นาที

Xu Chen , Hongsheng Lu , Gang Chen , Xin Wang. (2015) ในการวิจัยนี้เป็น การทดสอบขยายผลของการทดสอบความทนทานการแตกขวางสำหรับสองรอยเชื่อมของข้อ ต่อเชื่อมของท่อเหล็ก API X80 หลังการใช้งานแล้วได้ดำเนินการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและ เส้นโค้งความต้านทาน CTOD ของรอยเชื่อมได้อาร์คแบบยาว (LSAW) และรอยเชื่อมได้อาร์คแบบ เกลียว(SSAW) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโลหะฐาน (BM), โลหะเชื่อม (WM) และโซนที่ได้รับ ผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ค่าวิกฤตความทนทานต่อการแตกหักที่สำคัญถูกนำมา เปรียบเทียบกันด้วยแบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยา (OM), อิเล็กตรอนสแกนแบบส่องกราด (SEM) และสเปกโทรสโกปีของการกระจายพลังงาน (EDS) เพื่อหากลไกการแตกหักและการ ตกตะกอนองค์ประกอบ การหาค่าเหล่านี้จะให้การอ้างอิงที่สำคัญเกี่ยวกับการปฏิบัติด้าน วิศวกรรมและการประเมินโครงสร้างท่อ ซึ่งจากงานวิจัยพบว่า

- ความเหนียวแตกหักของเม็ดเกรนละเอียด HAZ (FGHAZ) สูงกว่าตลอดใน บริเวณ HAZ ของรอยเชื่อมซึ่งเกิดจากขนาดของเม็ดที่ละเอียดและสม่ำเสมอขึ้นซึ่งเกิดจากการ เชื่อมด้วยความร้อน
- ความเหนียวแตกหักของโลหะฐาน (BM) ของท่อ LSAW สูงกว่าค่า BM ของท่อ SSAW
- ความเหนียวแตกหักของโลหะเชื่อม (WM) ของท่อ LSAW นั้นต่ำกว่าโลหะเชื่อม ของท่อ SSAW
- ค่าความเหนียวแตกหักของโลหะฐาน (BM) มีค่าสูงสุดตลอดรอยต่อในท่อ SSAW ดังผลลัพธ์ของเม็ดเกรนหยาบทั้งที่เกิดจากการเชื่อมความร้อนใน WM และ HAZ และการ ตกตะกอนทรงกลมของโมลิบดีนัมมีความเหนียวแตกหักลดลงในตำแหน่งนี้

Yonghe Yang , Lei Shi , Zhen Xu , Hongsheng Lu , Xu Chen , Xin Wang. (2015) ได้ทำการ ศึกษาโครงสร้างจุลภาค คุณสมบัติเชิงกลและความเหนียวแตกหักของวัสดุที่ ตำแหน่งต่าง ๆ ของรอยต่อเชื่อมของท่อเหล็ก X80 ที่อุณหภูมิห้อง การทดสอบความเหนียวแตกหัก แบบยืดหยุ่น - พลาستيكของการแตกปลายรางเปิด (CTOD) และ J-integral ของวัสดุเชื่อมและวัสดุ ฐานได้ดำเนินการนำไปสู่ ระบบการวัดด้วยเกจวัดการยึดชนิดสองตัวหนีบแบบไม่สัมผัสถูกพัฒนา และใช้ทดสอบการแตกหัก การทดสอบความเหนียว พบว่าบริเวณฟิวชั่น (FZ) เป็นเขตเสี่ยงต่อการ แตกหักของ X80 ของรอยเชื่อมเหล็ก และการเกิดขึ้นขององค์ประกอบ martensite – austenite (M – A) ที่เปราะมากมีความสำคัญเนื่องจากการชุบแข็งแบบเชื่อมและแบบเปราะ ในงานวิจัยนี้ได้มี การสรุปเพิ่มเติมว่า

- ท่อเหล็ก X80 เป็นเหล็กไมโครอัลลอยด์แบบอซิคูลาร์เฟอร์ไรต์(AF)เกรดทั่วไป โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมของเหล็กกล้า X80 แตกต่างจากโลหะฐานและบรรจุเฟอร์ไรต์แบบ widmanstatten เม็ดผลึกของ HAZ นั้นหยาบในองศาที่ต่างกันระหว่างกระบวนการเชื่อม เม็ดผลึกหยาบมีส่วนทำให้เกิดการก่อตัวและการเติบโตของการรวมตัวที่เปราะบางของ M-A
- ความแข็งของรอยเชื่อมที่มากขึ้นและลดลงของการเชื่อมเหล็กกล้า X80 ทั้งสองเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเชื่อม จุดสูงสุดความแข็งของรอยเชื่อมของท่อเหล็ก X80 จะปรากฏขึ้นที่ FZ และความแข็งต่ำสุดจะปรากฏขึ้นที่ FGHAZ รอยต่อเชื่อมของท่อเหล็ก X80 นั้นมีการเปรียบเทียบกันค่อนข้างยากเนื่องจาก WM มีความสัมพันธ์ค่อนข้างแยงของพลาสติกและความเหนียวแตกหักเนื่องจากเฟอร์ไรต์แบบ widmanstatten
- ค่าความทนทานต่อการแตกหักที่สำคัญของ FZ นั้นแยงที่สุดในข้อต่อแบบเชื่อมทั้งหมดของเหล็กกล้า X80 กระบวนการเชื่อมส่งผลให้เกิดรอยแตกใน HAZ ของรอยเชื่อมเหล็ก X80 และ FZ เป็นเขตเสี่ยงต่อการแตกหัก การเกิดขึ้นจำนวนมากของแถบองค์ประกอบ M-A มีบทบาทของต้นกำเนิดการแตกหัก

Jun Hua, Lin-XiuDu, Jian-JunWang, HuiXie, Cai-RuGao, R.D.K.Misra, (2014) การวิจัยนี้ได้รับแรงบันดาลใจจากการจับคู่ที่ไม่เหมาะสมของแถบยึดระหว่างเฟอร์ไรต์และวานเนเดียมไนไตรด์ (VN) ซึ่งได้อธิบายไว้ที่นี่คือ การจำลองวงจรความร้อนที่ให้ความเหนียวสูงใน ICRCGHAZ ของเหล็กคาร์บอนต่ำ V-N พฤติกรรมที่เป็นหนึ่งเดียวนี้เกิดจากการก่อตัวของเฟอร์ไรต์ที่ละเอียดเป็นพิเศษในออสเทนไนต์ก่อนขอบเขตของเกรนที่สร้างขึ้นจากวัฏจักรความร้อนในการเชื่อมผ่านครั้งแรกที่มีขอบเขตการวางแนวผิวดูดสูง โดยที่ V (C, N) เกิดการตกตะกอนทำให้เกิดไซต์นิวเคลียสที่มีศักยภาพสำหรับเฟอร์ไรต์ นำไปสู่การลดลงของส่วนประกอบคาร์บอนใน martensite / austenite (M / A) ส่วนประกอบไนโตรเจนช่วยกระตุ้นพฤติกรรมตกตะกอน ของ V (C, N) นิวเคลียสของความหนาแน่นสูงของ V (C, N) ตกตะกอนใช้ปริมาณคาร์บอนในออสเทนไนต์นำไปสู่การลดลงของปริมาณคาร์บอนในองค์ประกอบ M / A โดยมีความแข็งลดลงตามมา การเพิ่มขึ้นของความเหนียวนั้นถูกอธิบายในแง่ของทฤษฎีการขยายตัวของรอยแตกของ Griffith

การจำลองวงจรความร้อนเชื่อมได้ดำเนินการโดยใช้เครื่องจำลองทางความร้อน ซึ่งงานจำลองถูกตัดจากตรงกลางของเหล็กแผ่นรีดตามทิศทางแนวขวางแล้วกลึงให้มีขนาด 11 มม.x 11 มม.x55 มม. อุณหภูมิของวงจรความร้อนเชื่อมถูกควบคุมโดยระบบควบคุมวงปิดโดยใช้ Rykalin 2 มิติ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองกระบวนการเชื่อมของแผ่นชิ้นงานมีความหนา 20 มม. จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า ใน UACG HAZ ที่ Tp2 ของ 150 ° C โครงสร้างจุลภาค

ประกอบด้วยโครงสร้างของ acicular ferrite, granular bainite และปริมาณเล็กน้อยของเฟอไรต์รูปหลายเหลี่ยม ใน ICRCG HAZ ที่ Tp2 ของ 800 °C เฟอไรต์ acicular และเม็ด bainited กระจายเข้าสู่ภายใน PAGB ที่มีการอบคืนตัว ส่วนหนึ่งของเกรนไบไนท์ตามแนว PAGB ถูกทำให้ได้รับการปรับสภาพใหม่และเปลี่ยนเป็นขนาด 1–3 ไมครอน ซึ่งเป็นเกรนที่มีความละเอียดมาก ใน SCRCG HAZ ที่ Tp2 ของ 1,000 °C โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยผลึกเฟอไรต์ขนาดเล็ก pearlite ที่เชื่อมสภาพและส่วนประกอบของ M / A

Lehto และคณะ (2014) ศึกษาผลของการกระจายขนาดเกรนต่อความสัมพันธ์ Hall-Petch ในเหล็กโครงสร้างที่ผ่านการเชื่อม โดยเสนอวิธีใช้ค่าเฉลี่ยขนาดเกรนแบบถ่วงน้ำหนัก ปริมาตรเพื่ออธิบายความแข็งแรงของโลหะที่มีโครงสร้างจุลภาคไม่สม่ำเสมอ พบว่าการกระจายขนาดเกรนที่กว้างในโลหะเชื่อมส่งผลต่อความแข็งแรงและความแข็ง และสมการ Hall-Petch แบบปรับปรุงด้วยวิธีนี้สามารถทำนายสมบัติเชิงกลได้แม่นยำทั้งในโลหะฐานและโลหะเชื่อม ผลลัพธ์นี้ช่วยให้เข้าใจและประเมินสมบัติเชิงกลของเหล็กโครงสร้างที่ผ่านกระบวนการเชื่อมได้ดียิ่งขึ้น

Syukran และคณะ (2022) งานวิจัยนี้ศึกษาค่าความแข็งแรงของโลหะเชื่อมด้วยอิเล็กโทรด E7016 และ E7018 ที่กระแสไฟฟ้าต่างกัน พบว่า E7018 ให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่า E7016 ในทุกกระแสไฟฟ้า โดยค่าความแข็งแรงของทั้งสองชนิดจะลดลงเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าความแตกต่างขององค์ประกอบและกระแสไฟฟ้ามักมีผลต่อค่าความแข็งแรงของโลหะเชื่อม ข้อมูลนี้ช่วยในการเลือกใช้อิเล็กโทรดให้เหมาะสมกับงานเชื่อมที่ต้องการคุณสมบัติด้านความแข็งแรงเฉพาะ

Díaz Ávila และคณะ (2023) ศึกษาผลของค่าความร้อนต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเหล็ก ASTM A572 Grade 50 ด้วยกระบวนการ GMAW และแก๊สปกป้อง 90% Ar-10% CO₂ โดยพบว่ารอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงและความแข็งแรงสูงกว่าเนื้อโลหะฐานเนื่องจากมีโครงสร้าง acicular ferrite ในเขตหลอมละลาย ขณะที่ HAZ มี bainite, pearlite และ ferrite ความกว้างของ HAZ เพิ่มขึ้นตามค่าความร้อน และค่าความแข็งแรงสูงสุดกับความแข็งแรงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างรอยเชื่อมทั้งสองระดับความร้อน ผลลัพธ์นี้ช่วยให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การเชื่อมกับสมบัติของรอยเชื่อมสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรม

Hamdey และคณะ (2024) ศึกษาการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 กับเหล็กกล้า ASTM A516 ด้วยกระบวนการ SMAW โดยเปรียบเทียบผลของการเลือกอิเล็กโทรด (E7018 และ E310) และการอบร้อนหลังเชื่อม (PWHT) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาค

พบว่า E310 ให้ความเข้ากันทางโลหะวิทยาและสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า E7018 ขณะที่การอบร้อนหลังเชื่อมที่ 600°C ช่วยเพิ่มความแข็งแรง การยึดตัว และความเหนียวของรอยเชื่อมโดยลดความเค้นตกค้างและทำให้โครงสร้างละเอียดขึ้น ผลลัพธ์ชี้ว่าการควบคุมพารามิเตอร์การเชื่อมและการเลือกอิเล็กโทรดที่เหมาะสมร่วมกับการอบร้อนหลังเชื่อมมีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพรอยเชื่อมสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรม

Gangwar และ Kumar (2024) ศึกษาความสามารถในการเชื่อมของเหล็ก GRADE 50 ASTM A572, GRADE A36 ASTM และ GRADE 40C8 ASTM ด้วยกระบวนการ SMAW โดยใช้การวิเคราะห์แบบ RSM เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของกระแสไฟฟ้า ความเข้มสนามแม่เหล็ก และความถี่ พบว่าตัวแปรทั้งสามนี้มีผลต่อคุณสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรงและความเหนียวของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าการควบคุมพารามิเตอร์เหล่านี้ช่วยเพิ่มความสมบูรณ์และลดต้นทุนการผลิต รวมทั้งส่งเสริมความปลอดภัยและการพัฒนาเทคโนโลยีการเชื่อมสำหรับอุตสาหกรรมต่าง ๆ

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

วัตถุประสงค์และขอบเขตในการดำเนินการเพื่อศึกษาความเสียหายที่มีต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า HSLA มาตรฐาน ASTM A572GR50 ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานในการเชื่อม กรรมวิธีในการเชื่อม การเตรียมชิ้นงานทดสอบ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือในการดำเนินการทดสอบสมบัติทางกล การตรวจสอบการองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค

การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้กระบวนการเชื่อมแบบไฟฟ้า (Shield Metal arc welding) โดยลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมมาตรฐาน E7018 และ E8018 ชิ้นงานที่สร้างขึ้นมาจากวัสดุเกรด Corten A โดยลวดเชื่อมนี้จะมีปริมาณธาตุพื้นฐานที่แตกต่างกัน ส่วนธาตุอื่น ๆ จะมีปริมาณใกล้เคียงกัน

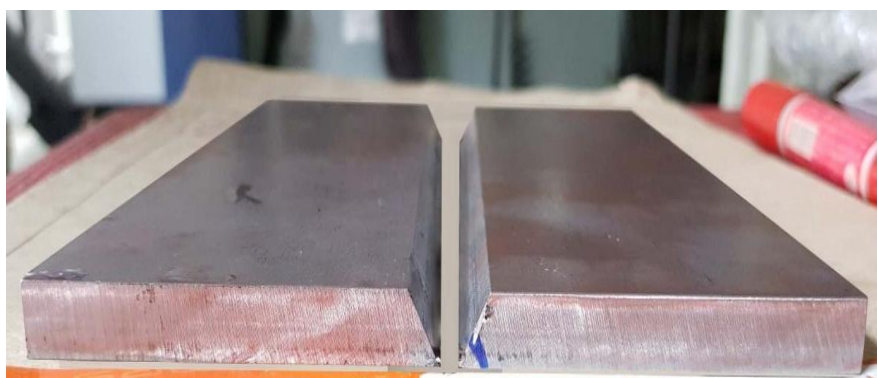
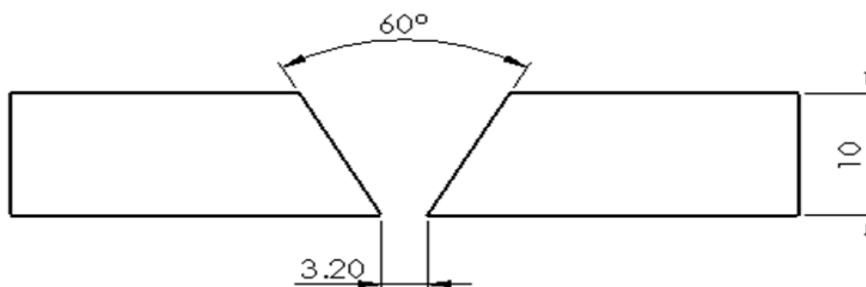
ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. กลั่นกรองงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ออกแบบการทดสอบ และกำหนดรูปแบบการทดสอบ
3. จัดหาเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับกรวิจัยและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ
4. จัดเตรียมชิ้นงานสำหรับงานวิจัย
5. จัดทำชิ้นงานสำหรับนำไปทำการทดสอบ
6. ทดสอบชิ้นงานตามที่ออกแบบไว้
7. เก็บข้อมูล แปรผลข้อมูล วิเคราะห์ผลข้อมูล สรุปและรายงานผลข้อมูล

3.1 การเตรียมชิ้นงานในการเชื่อม

3.1.1 ตัดเหล็กกล้า A572GR50 เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีขนาด 150 x 200 x 10 mm เพื่อใช้เป็นชิ้นงานในการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่ 90 A และ 110 A สำหรับลวดเชื่อม E7018 และกระแสไฟฟ้า 110 A สำหรับลวดเชื่อม E8018

3.1.2 ปากชิ้นงานเป็นร่องรอยต่อแบบตัววีด้านเดียว (Single V groove) มุมรวม 60 ° ระยะห่างของขอบชิ้นงานทั้งสองชั้นที่ฐาน (root opening) ขนาด 3.2 mm ดังแสดงในภาพประกอบ 3.1 เตรียมชิ้นงานด้วยเครื่องกัดเนื่องจากไม่มีผลต่อความแข็งของชิ้นงาน



ภาพประกอบ 22 ชิ้นงานบากร่องวีสำหรับกระบวนการเชื่อม

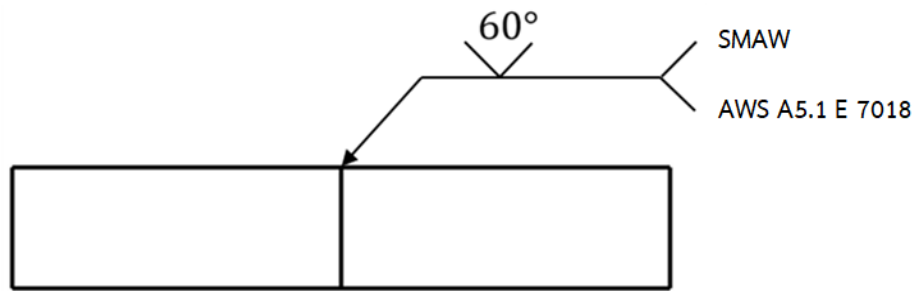
3.2 กรรมวิธีในการเชื่อม

3.2.1 ชิ้นงานเชื่อมด้วยกระบวนการ SMAW โดยใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 90 A และ 110 A สำหรับลวดเชื่อม E7018 และกระแสไฟฟ้า 110 A สำหรับลวดเชื่อม E8018 ซึ่งตัวแปรในการเชื่อม ดังแสดงในตาราง 7

3.2.2 นำชิ้นงานในข้อ 3.1 มาเชื่อมพอกชิ้นงานจนเต็มรอยบากร่องวี ประมาณ 4 แนว ในตำแหน่ง 1G (ท่าราบ)

3.2.3 หลังจากผ่านกระบวนการเชื่อมเสร็จ ดังแสดงในภาพประกอบ 24 ปล่อยให้ชิ้นงานเชื่อมเย็นตัวลงในอากาศแล้วจึงนำไปเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.2.4 ตัวแปรที่เปลี่ยน คือ กระแสในการเชื่อมโดยหนึ่งลวดเชื่อม คือ E7018 จะใช้กระแสสองค่า ส่วนลวดเชื่อม E8018 ใช้กระแสเดียว ซึ่งเป็นลวดเชื่อมที่ถูกแนะนำกระแสจากผู้ผลิต ตัวแปรตามคือความแข็งแรง ความแข็ง การดูดซับแรงกระแทก ส่วนประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค



ภาพประกอบ 23 สัญลักษณ์ในการเชื่อม

ตาราง 5 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม

ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม			
กระแสไฟฟ้า (A)	90	110	110
Heat Input (kJ/mm)	1.053	1.287	1.28
มุมของหัวลวดเชื่อม(°)	90	90	90
อัตราเร็วในงานเชื่อม (mm/min)	100	100	100
แรงดันไฟฟ้า (V)	30	30	30
วัสดุที่ใช้ในการทดลองในการเชื่อม	A572GR	A572G	A572
ลวดเชื่อม	E 7018	E 7018	E 7018
กระบวนการเชื่อม	SMAW	SMAW	SMAW

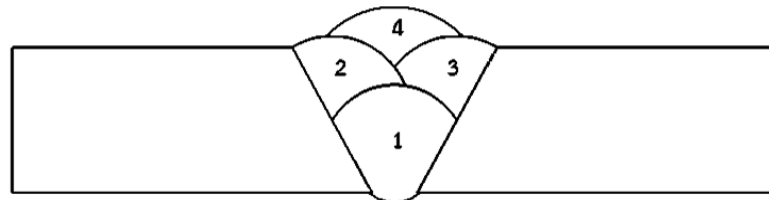


(ก)

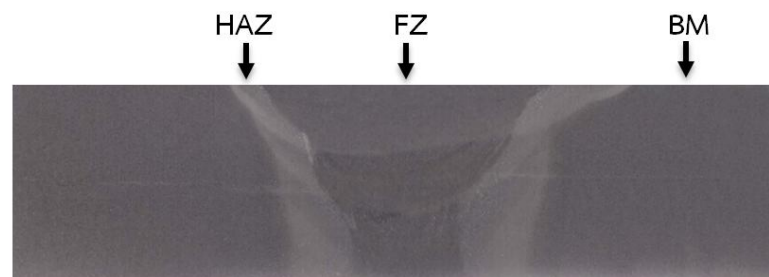
(ข)

ภาพประกอบ 24 ตัวอย่างแนวเชื่อม (ก) กระแสไฟฟ้าที่เชื่อม 90 A (ข) กระแสไฟฟ้าที่เชื่อม 110

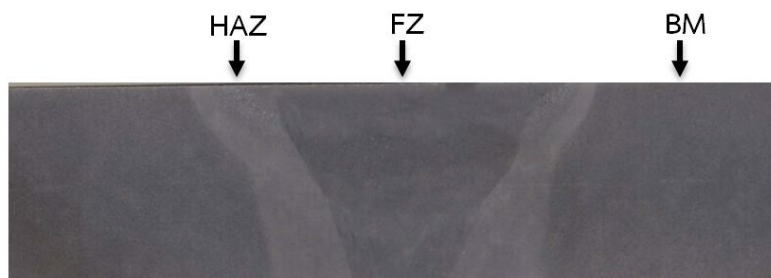
A



ภาพประกอบ 25 ชั้นแนวเชื่อม



ภาพประกอบ 26 หน้าตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A



ภาพประกอบ 27 หน้าตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A

3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ (Specimen)

3.3.1 เตรียมชิ้นงานทดสอบออกเป็น 3 ชุด ดังนี้

3.3.1.1 ชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม

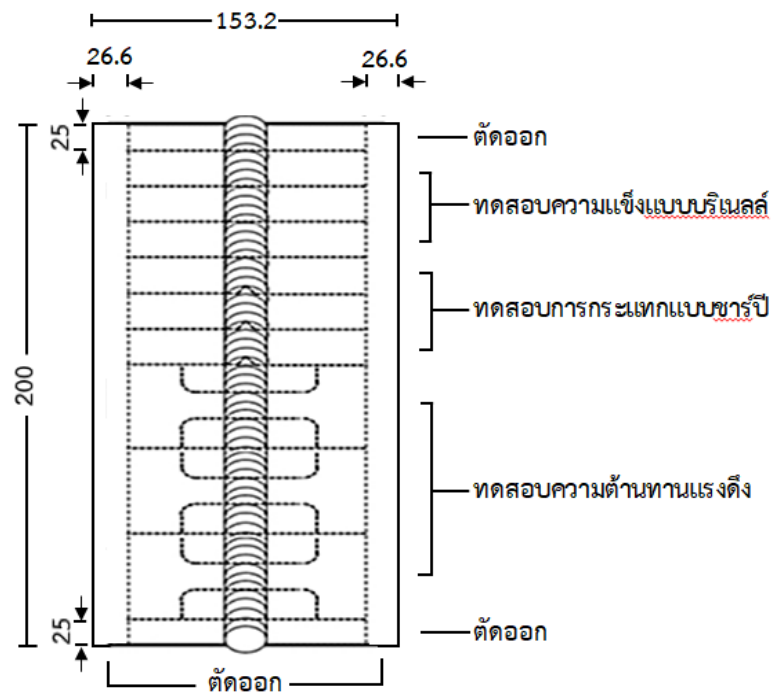
3.3.1.2 ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม E7018 กระแสไฟฟ้า 90 A

3.3.1.3 ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อม E7018 ด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A

3.3.1.4 ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อม E8018 ด้วยกระแสไฟฟ้า 110

3.3.2 ตัดชิ้นงานทดสอบออกเป็นส่วนๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 3.7 ทำการแบ่งชิ้นงาน

ทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบแต่ละประเภทเพื่อนำไปทดสอบความแข็งแรง ทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ และทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี



ภาพประกอบ 28 แบบจำลองการตัดชิ้นงานทดสอบ

3.4 วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการดำเนินงาน

3.4.1 เหล็กกล้า HSLA มาตรฐาน ASTM A572GR50

เหล็กไมโครอัลลอยด์ ASTM A572GR50 จัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (HSLA) ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตาราง 8

ตาราง 6 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า A572GR50

ส่วนผสมทางเคมี	ปริมาณ (wt%) A572GR50
C	0.15
Si	0.24
Mn	1.15
P	0.0175
S	0.0052
Cr	0.02
Ni	0.02
Cu	0.02
V	0.01-0.15

ที่มา: ใบรับรองส่วนผสมปริมาณธาตุจากบริษัทผู้ผลิต นิปปอน สตีล ประเทศไทยจำกัด ออกโดยสถาบันเหล็กประเทศไทย

3.4.2 เครื่องเชื่อม SMAW

เครื่องเชื่อม SMAW ยี่ห้อ Miller รุ่น CST 280 เป็นเครื่องเชื่อมไฟฟ้าที่ใช้ระบบไฟฟ้า AC/DC ระบบควบคุมโดยใช้ปุ่มสวิตช์กดที่หน้าเครื่องเชื่อม เมื่อเชื่อมในโหมด SMAW จ่ายกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมช่วง 5-280 A สำหรับกำลังไฟฟ้า 3 เฟส และจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมช่วง 5-200 A สำหรับกำลังไฟฟ้า 1 เฟส ดังแสดงในภาพประกอบ 29



ภาพประกอบ 29 เครื่องเชื่อม SMAW ยี่ห้อ Miller รุ่น CST 280

3.4.3 ลวดเชื่อม E 7018

ลวดเชื่อมที่ใช้สำหรับในกระบวนการเชื่อม SMAW ใช้ลวดเชื่อมมาตรฐาน AWS/A5.1 E 7018 เป็นลวดเชื่อมยี่ห้อ GIMINI 7018LT ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 mm ความยาว 350 mm เป็นลวดเชื่อมเบสิกชนิดไฮโดรเจนต่ำ แนวเชื่อมสามารถทนแรงกระแทกได้สูงในสภาวะอุณหภูมิต่ำถึง -20°C ส่วนผสมทางเคมีและคุณสมบัติทางกล ดังแสดงในตาราง 7

3.4.4 ลวดเชื่อม E8018

ลวดเชื่อมที่ใช้สำหรับกระบวนการเชื่อม SMAW ใช้ลวดเชื่อมมาตรฐาน AWS/A5.5 E8018 เป็นลวดเชื่อมยี่ห้อ YAWATA8018-B2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 mm ความยาว 350 mm เป็นลวดเชื่อมควบคุมไฮโดรเจน แนวเชื่อมสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตาราง 9

ตาราง 7 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม E 7018

ส่วนผสมทางเคมี	ปริมาณ (%)
C	0.06
Mn	1.08
Si	0.52

ที่มา: ใบรับรองส่วนผสมปริมาณธาตุจากบริษัทผู้ผลิตลวดเชื่อมยี่ห้อ Gemini ออกโดยสถาบันผู้ผลิตลวดเชื่อมประเทศญี่ปุ่น

ตาราง 8 ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อม E8018

ส่วนผสมทางเคมี	ปริมาณ(%)
C	0.10
Mn	0.80
Si	0.40
P	≤0.02
S	≤0.02
Cr	1.20

ที่มา: ใบรับรองส่วนผสมปริมาณธาตุจากบริษัทผู้ผลิตลวดเชื่อมยี่ห้อ Yawata ออกโดยสถาบันผู้ผลิตลวดเชื่อมประเทศไทย

3.4.5 เครื่องขัดโลหะ (Grinding & Polishing Machine)

เครื่องขัดชิ้นโลหะที่ใช้เป็นของยี่ห้อ BUEHLER รุ่น BETA เป็นจานกลมขนาด 8 inch สามารถติดตั้งกระดาษทรายและผ้าขัด ซึ่งสามารถปรับความเร็วของจานขัดได้ ดังแสดงในภาพประกอบ 30



ภาพประกอบ 30 เครื่องขัดโลหะ ยี่ห้อ BUEHLER รุ่น BETA

3.4.6 เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Tester)

เครื่องทดสอบความแข็ง ที่ใช้เป็นการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ ยี่ห้อ AFFRI รุ่น BREVETTI ดังแสดงในภาพประกอบ 31



ภาพประกอบ 31 เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ ยี่ห้อ AFFRI รุ่น BREVETTI

3.4.7 เครื่องทดสอบความแข็งแรง (Tensile Tester)

เครื่องทดสอบความแข็งแรงที่ใช้เป็นของยี่ห้อ Shimadzu รุ่น Autograph AG-IS 100kN ดังแสดงในภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 32 เครื่องทดสอบความแข็งแรง ยี่ห้อ SATEC รุ่น Autograph AG-IS 100kN

3.4.8 เครื่องทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy Impact Tester)

เครื่องทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปีที่ใช้เป็นของยี่ห้อ ROELL AMSLER รุ่น RPK 300 ดังแสดงในภาพประกอบ 34



ภาพประกอบ 33 เครื่องทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี ยี่ห้อ Zwick Roell รุ่น PSW750

3.4.9 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้เป็นชนิดที่เหมาะสมกับงานทางโลหะวิทยา ซึ่งใช้กล้อง 2 ชนิด
ดังนี้

3.4.9.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM) มีกำลังขยายตั้งแต่ 50-500 เท่า ยี่ห้อ ZEISS รุ่น Axio Observer 3 materials ดังแสดงในภาพประกอบ 34

3.4.9.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope: SEM) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น SU3500 ดังแสดงในภาพประกอบ 35



ภาพประกอบ 34 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) ยี่ห้อ ZEISS รุ่น Axio Observer 3 materials



ภาพประกอบ 35 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น SU3500

3.5 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

ขั้นตอนการทดสอบความแข็งนั้นจะทำการวัดค่าความแข็งแบบบริเนลล์ ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ ยี่ห้อ AFFRI รุ่น BREVETTI มีขั้นตอนดังนี้

3.5.1 ตัดชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมและที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า โดยมีขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 10-96 ดังแสดงในภาพประกอบ

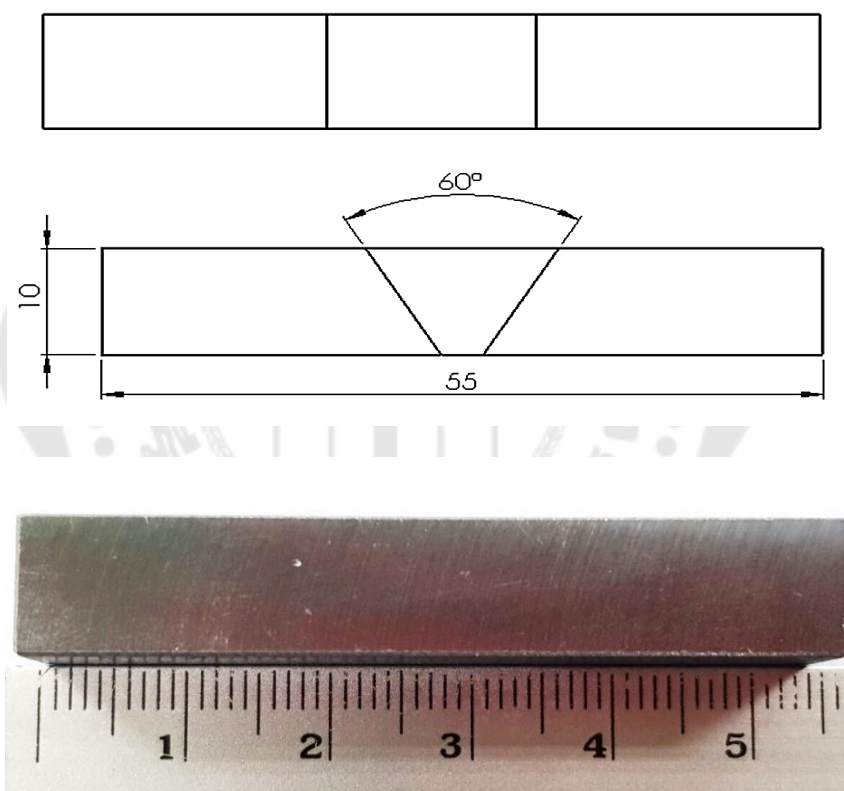
3.5.2 กำหนดระบุตำแหน่งทดสอบลงบนผิวหน้าชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในภาพประกอบ 41 เพื่อแสดงตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบความแข็งโดยกดกระจายบนจุดต่าง ๆ บนผิวหน้าชิ้นงานทดสอบ

3.5.3 การทดสอบความแข็งจะมีส่วนสัมพันธ์กัน 3 ส่วนคือ ระยะกด ความแข็ง แรงกดที่ใช้ในการทดสอบ

3.5.4 ทำการทดสอบ 5 บริเวณ บริเวณละ 3 ครั้ง เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำ

3.5.5 บันทึกผลการทดสอบ

3.5.6 สรุปผลการทดสอบ



ภาพประกอบ 36 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ มาตรฐาน ASTM E10-96

3.6 การทดสอบความแข็งแรง

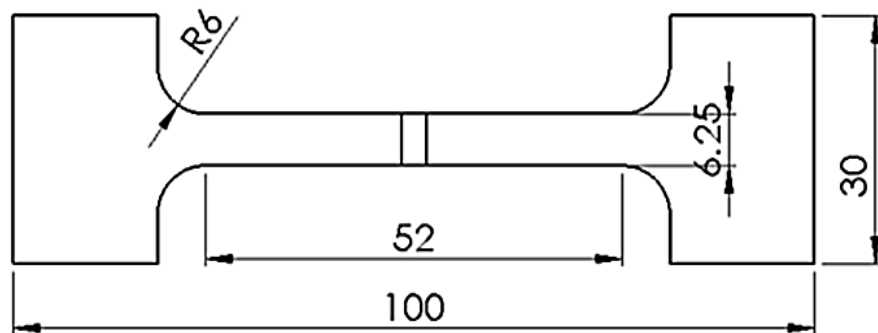
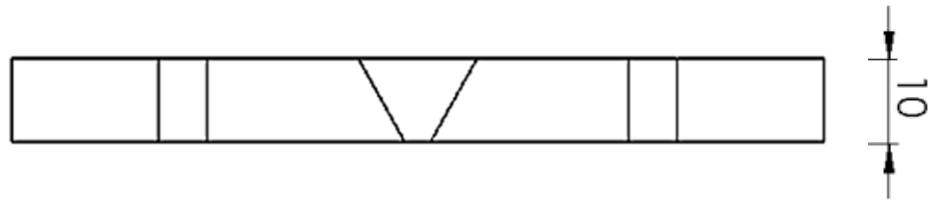
ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแรงจะทำการ จะทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรง ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น Autograph AG-IS 100 kN

3.6.1 ตัดชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมและที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า โดยมีขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 8M ดังแสดงในภาพประกอบ 37

3.6.2 ทำการทดสอบ 3 ครั้ง เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำ

3.6.3 บันทึกผลการทดสอบ

3.6.4 สรุปผลการทดสอบ



ภาพประกอบ 37 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรง มาตรฐาน ASTM E 8M

3.7 การทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี

ขั้นตอนการทดสอบการกระแทกจะทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี ยี่ห้อ Zwick Roell รุ่น PSW750

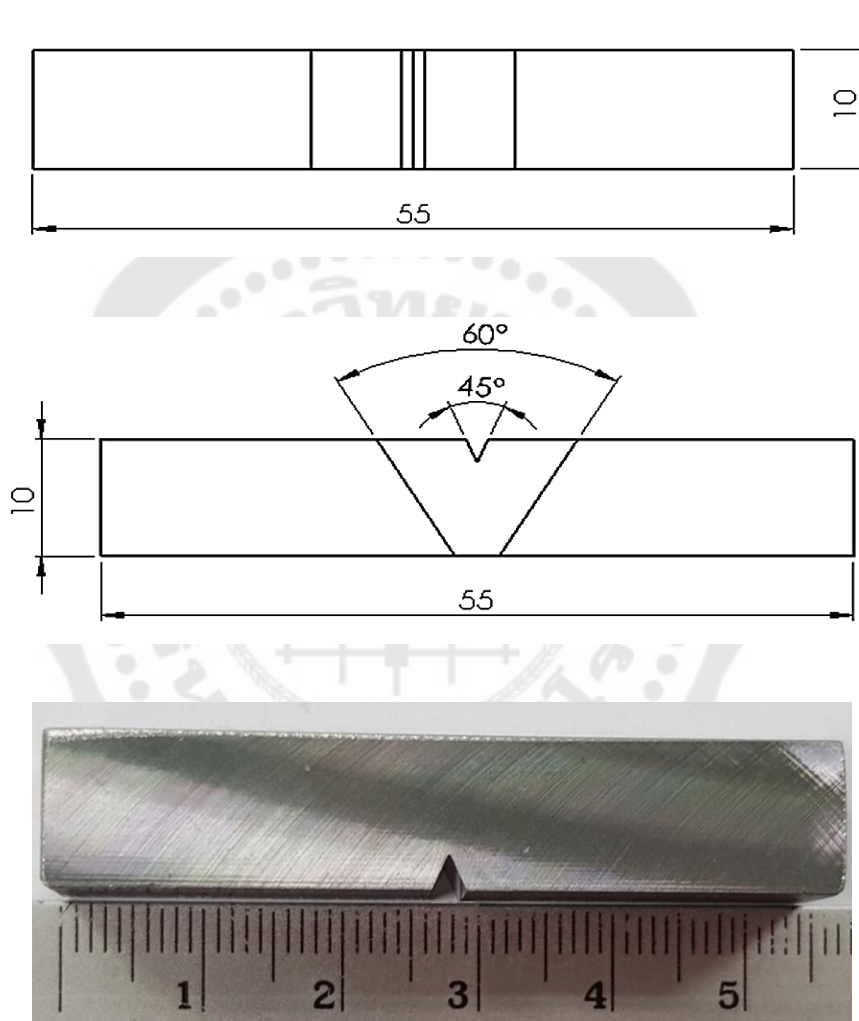
3.7.1 ตัดชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมและที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า โดยมีขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 23 ดังแสดงในภาพประกอบ 38

3.7.2 เตรียมชิ้นงานทดสอบเพื่อบากเป็นรูป V-notch มุม 45 บริเวณตรงกลางแนว
เชื่อมตามมาตรฐาน ASTM E 23

3.7.3 ทำการทดสอบ 3 ครั้ง เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำ

3.7.4 บันทึกผลการทดสอบ

3.7.5 สรุปผลการทดสอบ



ภาพประกอบ 38 ชิ้นงานทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี มาตรฐาน ASTM E 23

3.8 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค

ขั้นตอนการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค ทำการตรวจสอบ
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น SU3500 ด้วยเทคนิค
การตรวจจับสัญญาณเอ็กซ์เรย์ (EDS)

ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเพื่อวัดขนาดเกรน ทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) ยี่ห้อ ZEISS รุ่น Axio Observer 3 materials และทำการวัดขนาดเกรนด้วยซอฟต์แวร์ Axio 2.1

3.8.1 ตัดชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมและที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า แล้วจึงทำการหล่อชิ้นงานด้วยเรซินโดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่างเรซินและตัวเร่งปฏิกิริยา 2:1 เทใส่แม่พิมพ์รองจนกระทั่งเรซินแข็ง ดังแสดงในภาพประกอบ 40-42

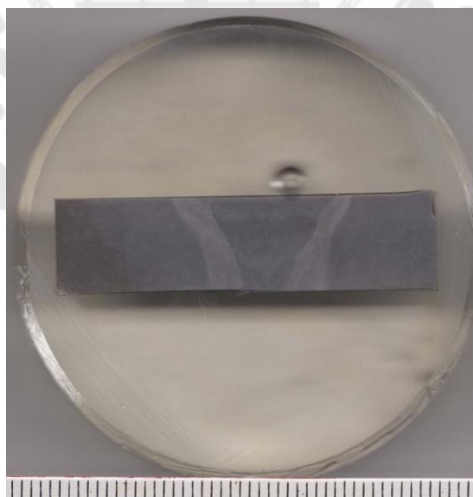
3.8.2 ขัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 360 600 800 1000 1200 1500 และ 2000 ตามลำดับ

3.8.3 ขัดชิ้นงานทดสอบด้วยผ้าสักหลาดที่มีผงอลูมินา

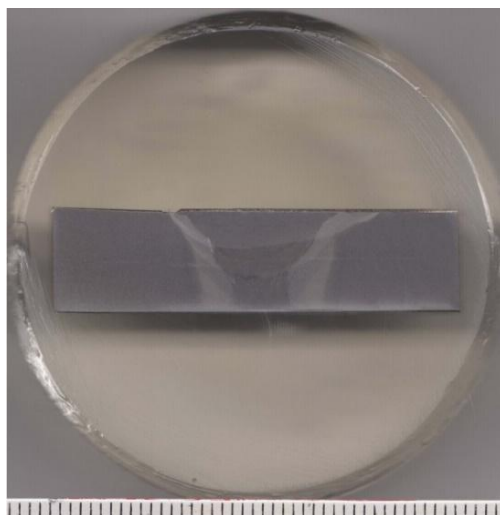
3.8.4 นำชิ้นงานทดสอบมากัดผิวหน้าด้วยกรดไนตริก 2 % เสร็จแล้วล้างด้วยแอลกอฮอล์ น้ำสะอาด เป่าลมให้แห้ง ตามลำดับ

3.8.5 สำหรับการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี จะใช้กรดกัดผิวชิ้นงานเพียงครั้งขึ้นเพื่อเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ที่ผ่านการกัดกรดกับไม่ผ่านการกัดกรดและป้องกันธาตุบางชนิดที่อาจถูก

ทำลายเนื่องจากกรด



ภาพประกอบ 39 ชิ้นงานทดสอบโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 ด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A



ภาพประกอบ 40 ชิ้นงานทดสอบโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อม
ไฟฟ้า E7018 ด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A



ภาพประกอบ 41 ชิ้นงานทดสอบโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวด
เชื่อมไฟฟ้า E8018 ด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบและอภิปรายผลจากการศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กไมโครอัลลอยด์ มาตรฐาน ASTM A572GR50 ที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมและที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A และ 110 A สำหรับลวดเชื่อมมาตรฐาน AWS/A5.1 E 7018 กระแสไฟฟ้า 110 A สำหรับลวดเชื่อมมาตรฐาน AWS/A5.1 E 8018

4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล

4.1.1 การวิเคราะห์ค่าความแข็ง

4.1.2 การวิเคราะห์ค่าแรงดึง

4.1.3 การวิเคราะห์ค่าการกระแทก

4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

4.3.1 บริเวณแนวเชื่อม

4.3.2 ระหว่างบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน

4.3.3 บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน

4.3.4 ระหว่างบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและบริเวณโลหะฐาน

4.3.5 บริเวณโลหะฐาน

4.3.6 การวิเคราะห์รอยแตกหักของบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ระดับจุลภาค

4.4 การวิเคราะห์ขนาดเกรน

4.4.1 บริเวณแนวเชื่อม

4.4.2 บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน

4.4.3 บริเวณโลหะฐาน

4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ฮาร์ดลัส-เพทซ์

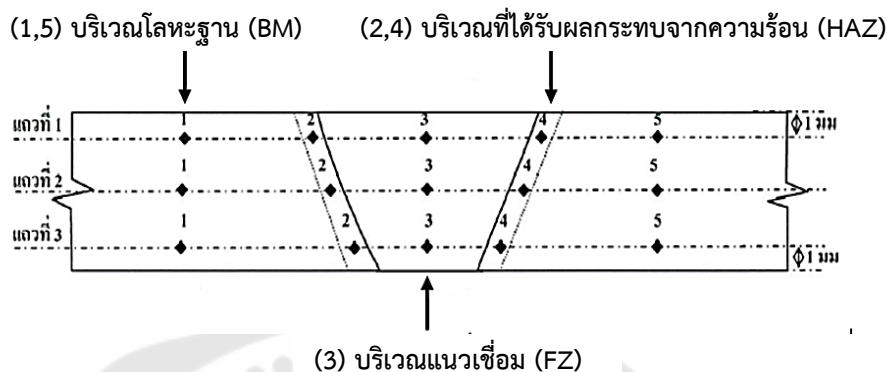
4.6 ผลกระทบของความร้อนจากลวดเชื่อม

4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล

4.1.1 การวิเคราะห์ค่าความแข็ง

ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 10-96 ผลจากความร้อนในกระบวนการเชื่อม SMAW ทำให้บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมีค่าความแข็งที่เปลี่ยนไปจากเนื้อโลหะเดิม (เหล็กกล้า A572GR50) การทดสอบความแข็งจะเริ่ม

ทดสอบจากบริเวณโลหะฐาน (BM) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) และบริเวณแนวเชื่อม (FZ) โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C แรงกด 150 kp การกำหนดตำแหน่งที่ทำการทดสอบความแข็งในแต่ละบริเวณ ดังแสดงในภาพประกอบ 42



ภาพประกอบ 42 ตำแหน่งที่ทำการทดสอบความแข็งในแต่ละบริเวณ

จากตารางที่ 11 เป็นที่สังเกตได้ว่าค่าความแข็งของบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมมีค่าความแข็งประมาณ 220.1 HB

จากตารางที่ 11 12 และ 13 เป็นที่สังเกตได้ว่าค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW โดยใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 90 A มีค่าความแข็งบริเวณโลหะฐาน (BM) ประมาณ 223.2 HB ค่าความแข็งบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ประมาณ 228.6 HB และค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ประมาณ 207.9 HB

ค่าความแข็งที่ของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW โดยใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 110 A มีค่าความแข็งบริเวณโลหะฐาน (BM) ประมาณ 219.4 HB ค่าความแข็งบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ประมาณ 223.6 HB และค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ประมาณ 202.5 HB(20)

ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW โดยลวดเชื่อม E8018 มีค่าความแข็งบริเวณโลหะฐาน (BM) เฉลี่ย 217.7 HB ค่าความแข็งบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) เฉลี่ย 231.8 HB ค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อม (FZ) เฉลี่ย 250 HB

ตาราง 9 ผลการทดสอบความแข็งบริเวณโลหะฐาน (BM)

บริเวณโลหะฐาน (BM)	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HB)
ไม่ผ่านการเชื่อม	220.1
กระแส 90 A(E7018)	223.2
กระแส 110 A(E7018)	219.4
กระแส 110 A(E8018)	217.7

ตาราง 10 ผลการทดสอบความแข็งบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ)

บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ)	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HB)
กระแส 90 A(E7018)	228.6
กระแส 110 A(E7018)	223.6
กระแส 110 A(E8018)	231.8

ตาราง 11 ผลการทดสอบความแข็งบริเวณแนวเชื่อม (FZ)

บริเวณแนวเชื่อม (FZ)	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HB)
กระแส 90 A(E7018)	207.9
กระแส 110 A(E7018)	202.5
กระแส 110 A(E8018)	250

4.1.2 การวิเคราะห์ค่าแรงดึง

ผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 8M ที่เตรียมจากเหล็ก A572GR50 ที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม ที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 กระแสไฟฟ้า 90 A , 110 A และลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 กระแส 110 A โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ดังแสดงในตาราง 14

จากตาราง 14 เป็นที่สังเกตได้ว่าผลการทดสอบความแข็งแรงพบว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดก่อนเชื่อมมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 645.52 N/mm^2 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดหลังผ่านการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 587.08 N/mm^2 และค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดหลังผ่านการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 625.95 N/mm^2 ซึ่งพบว่าในการเชื่อมที่กระแสไฟฟ้า 110 A จะมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดสูงกว่าผ่านการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A ดังแสดงในตารางที่ 14 เป็นที่สังเกตได้ว่ามีความสอดคล้องกับการทดสอบความแข็งแรงชิ้นงานทดสอบที่ใช้กระแสไฟฟ้า 110 A บริเวณแนวเชื่อม (FZ) มีค่าความแข็งแรงต่ำกว่ากระแสอื่นจึงส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงสูงสุด

จากการขาดของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A และ 110 A เป็นที่สังเกตได้ว่าตำแหน่งที่ขาดเกิดที่บริเวณแนวเชื่อม (FZ) เมื่อทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาค จะพบว่าในบริเวณแนวเชื่อม (FZ) มีโครงสร้างจุลภาคทั้งเฟอร์ไรต์ (Ferrite) เพิร์ลไลต์ (Pearlite) และออสเทนไนต์ (Austenite) และสามารถสังเกตเห็นถึงความหยาบของเกรนบริเวณแนวเชื่อม (FZ) จึงมีค่าความแข็งแรงต่ำแต่มีค่าความแข็งแรงสูง สังเกตได้จากผลการทดสอบความแข็งแรงที่บริเวณแนวเชื่อม (FZ) จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าบริเวณโลหะฐาน (BM) ซึ่งมีผลสอดคล้องกับการศึกษาโครงสร้างจุลภาค ส่งผลให้การทดสอบความแข็งแรงเกิดการขาดที่บริเวณรอยเชื่อม(21)

ตาราง 12 ผลการทดสอบความแข็งแรง

กระแส (A)	ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (N/mm^2)	การยึดตัว (%)	ตำแหน่งการขาด
ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม	645.52	29.72	เยื้องจากจุดศูนย์กลาง 10 mm
90(E7018)	587.08	27.06	แนวเชื่อม
110(E7018)	625.95	26.44	แนวเชื่อม
110(E8018)	628.07	31.07	เยื้องจากจุดศูนย์กลาง 14.1 mm

จากตาราง 14 พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 645.52 N/mm² การยืดตัวที่ 29.72% ตำแหน่งการขาดเยื้องจากจุดศูนย์กลาง 10 mm ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อม E7018 มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 625.95 N/mm² การยืดตัวที่ 26.44% ตำแหน่งการขาดที่แนวเชื่อม ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อม E8018 มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 628.07 N/mm² การยืดตัวที่ 31.07% ตำแหน่งการขาดเยื้องจากจุดศูนย์กลาง 14.1 mm

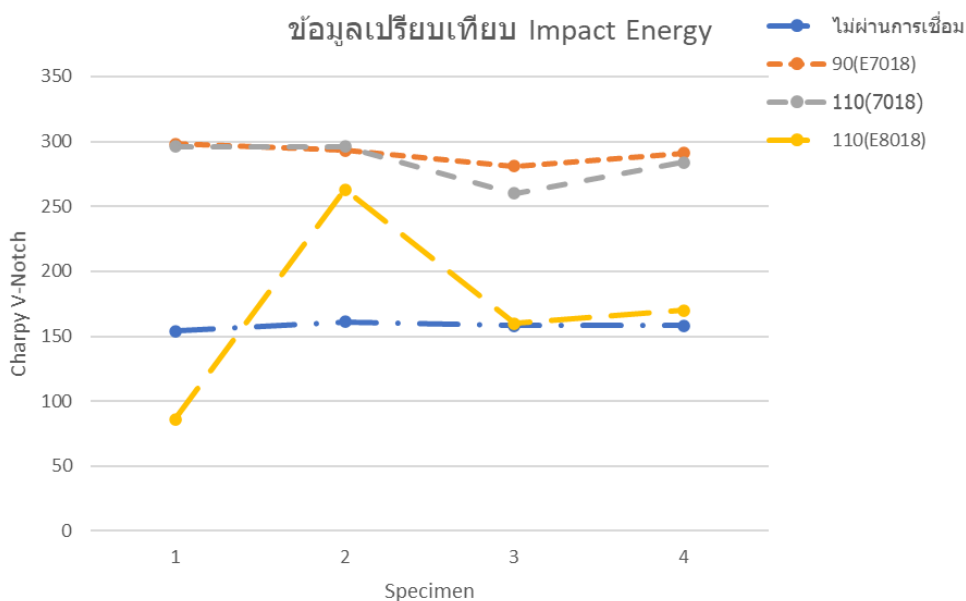
4.1.3 การวิเคราะห์ค่าการกระแทก

ผลการทดสอบการกระแทกชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 23 ที่เตรียมจากเหล็กกล้า A572GR50 ที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม และที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม E7018 กระแสไฟฟ้า 90 A, 110 A และลวดเชื่อม E8018 กระแส 110 A โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 27°C ดังแสดงในตาราง 15

จากตาราง 15 ชิ้นงานทดสอบการกระแทกรอยบากกลางแนวเชื่อมตามมาตรฐาน ASTM E23 ทดสอบที่อุณหภูมิ 27°C แสดงค่าการทดสอบการกระแทกของชิ้นงานทดสอบชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมมีค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกเฉลี่ย 158 J โดยที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม E7018 กระแสไฟฟ้า 90 A มีค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกเฉลี่ย 291 J ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A มีค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกเฉลี่ย 284 J และลวดเชื่อม E8018 กระแสไฟฟ้า 110 A มีค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกเฉลี่ย 169.97 J(6)

ตาราง 13 ผลการทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปีของลวดเชื่อม E7018

กระแส (A)	Absorb Energy (J)			เฉลี่ย (J)
	ขั้นที่ 1	ขั้นที่ 2	ขั้นที่ 3	
ไม่ผ่านการเชื่อม	154	161	158	158
90(E7018)	298	293	281	291
110(7018)	296	296	260	284
110(E8018)	86	263	160	169.97



ภาพประกอบ 43 ผลเปรียบเทียบ Impact Energy ของชิ้นงานทั้งสี่รูปแบบ

4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

เพื่อให้ทราบถึงองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 ที่กระแสไฟฟ้า 90, 110 แอมแปร์ และ E8018 โดยบริเวณที่ทดสอบ ได้แก่ 1.บริเวณแนวเชื่อม (FZ) 2.บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) 3.บริเวณโลหะฐาน (BM) ซึ่งจะไปตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องตรวจจับสัญญาณเอกซเรย์ (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แบ่งแยกรังสีเอกซเรย์เฉพาะตัว (Characteristic X-rays) ขององค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันด้วยสเปกตรัมเชิงพลังงานและทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์ประมวลผลสัญญาณ ซึ่งทำให้สามารถบอกถึงองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานได้

จากภาพประกอบ 44 และภาพประกอบ 47 เป็นที่สังเกตได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 กระแสไฟฟ้า 90 A และ 110 A ในบริเวณโลหะฐาน (BM) มีธาตุผสมหลักๆ คือ ซิลิกอน แมงกานีส และชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 110 A จะไม่มีธาตุซิลิกอน ซึ่งในแต่ละธาตุจะมีปริมาณที่แตกต่างกัน

จากภาพประกอบ 4.5 และ 48 เป็นที่สังเกตได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ

ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A และ 110 A ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบ

จากความร้อน (HAZ) มีธาตุผสมหลักๆ คือ ซิลิกอน แมงกานีส และเหล็ก ซึ่งในแต่ละธาตุ

จะมีปริมาณที่แตกต่างกัน

จากภาพประกอบ 44 และ 47 เป็นที่สังเกตได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A และ 110 A ในบริเวณแนวเชื่อม (FZ) มีธาตุผสมหลักๆ คือ ซิลิกอน แมงกานีส และเหล็ก ซึ่งในแต่ละธาตุจะมีปริมาณที่แตกต่างกัน

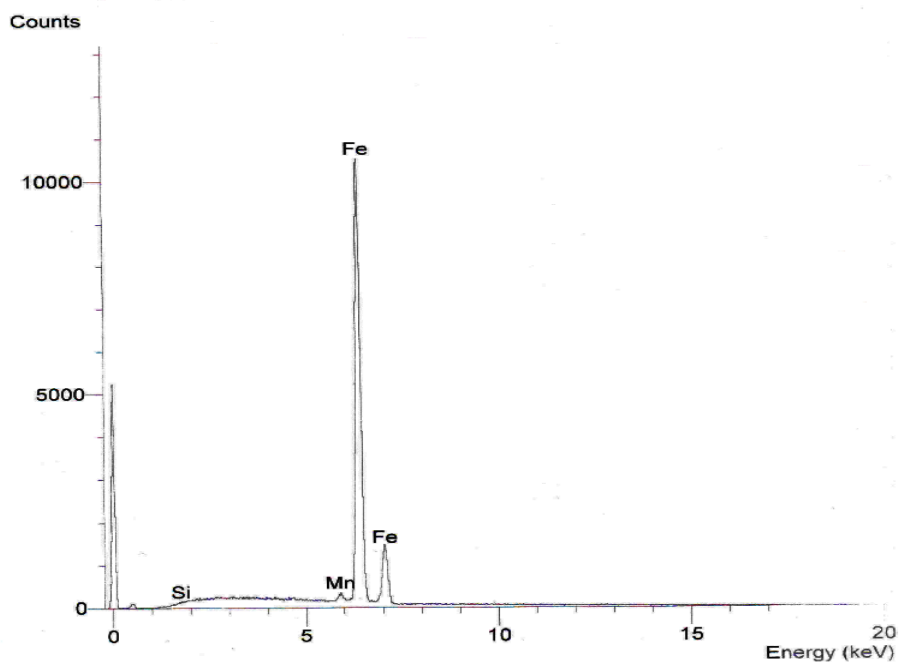
ซิลิกอน (Si) เป็นธาตุที่ไม่รวมกับคาร์บอนเมื่อผสมในเหล็กเพราะจะรวมกับเหล็กได้ดีกว่าคาร์บอน ซิลิกอนจัดอยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์มีบทบาทที่สำคัญ คือ ละลายได้ดีในเฟอร์ไรต์และเพิ่มความแข็งให้กับเฟอร์ไรต์โดยเฉพาะเพิ่มจุดคลาก (Yield point) ของเหล็กให้สูงขึ้น

แมงกานีส (Mn) เป็นธาตุผสมที่มีความสำคัญ เนื่องจากเป็นธาตุที่ช่วยเพิ่มความแข็งให้กับเนื้อเชื่อม แต่จะมีส่วนในการลดความเหนียว อีกประการหนึ่งที่เป็นบทบาทสำคัญของแมงกานีสในเนื้อเชื่อม คือ จับตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นเฟสภายในเนื้อเชื่อม ซึ่งเป็นที่เริ่มเกิดโครงสร้าง Acicular ferrite (10)

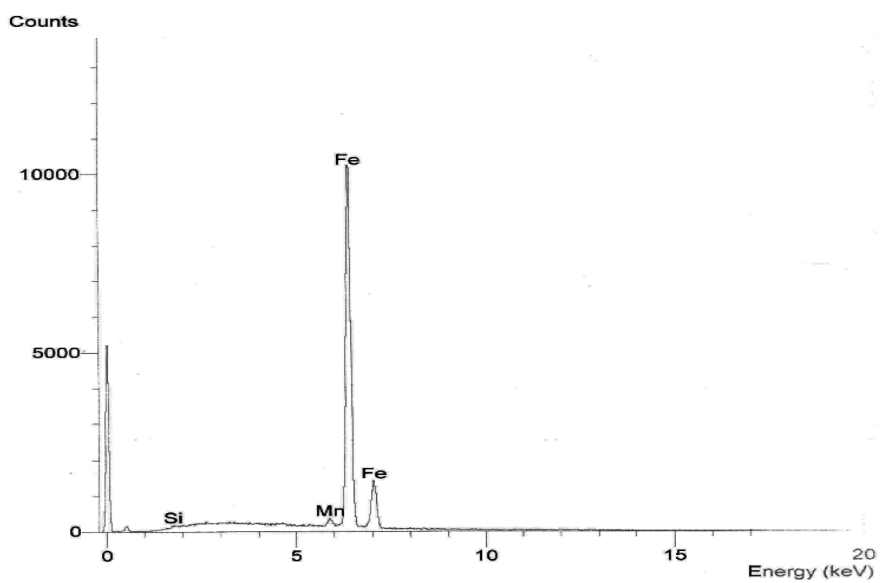
จากภาพประกอบ 44-51 จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 และ E8018 ที่กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ ในบริเวณโลหะฐาน (BM) และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) จะมีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายกันเนื่องจากทั้งสองบริเวณเป็นโลหะชนิดเดียวกัน โดยจะมีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกอน แมงกานีส เหล็กและคาร์บอน ซึ่งในแต่ละองค์ประกอบจะมีปริมาณที่แตกต่างกัน

จากภาพประกอบ 45 จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 ที่กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ ในบริเวณแนวเชื่อม (FZ) มีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกอน แมงกานีส เหล็กและคาร์บอน ซึ่งในแต่ละองค์ประกอบจะมีปริมาณที่แตกต่างกัน

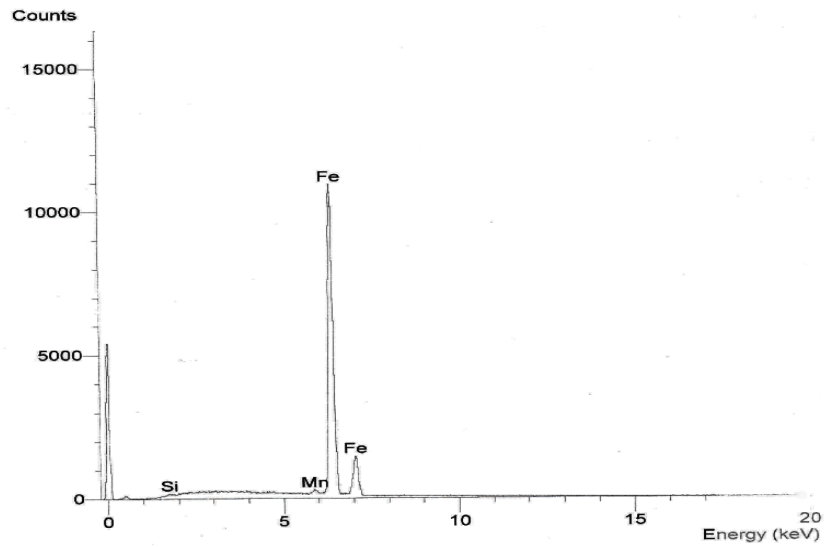
จากภาพประกอบ 46 จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 ที่กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ ในบริเวณแนวเชื่อม (FZ) มีองค์ประกอบเหมือนกับบริเวณแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 แต่จะมีองค์ประกอบที่เพิ่มขึ้นมาอีกคือ โครเมียมและทองแดง



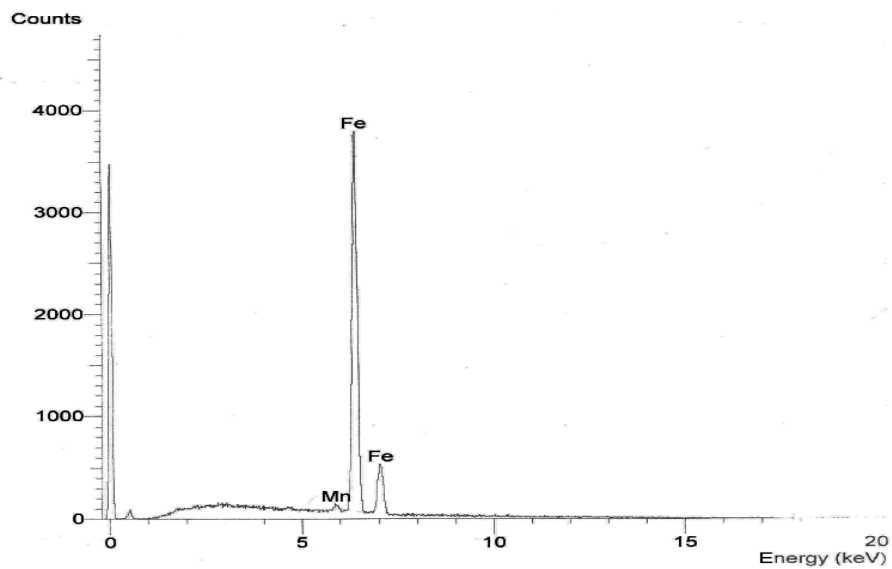
ภาพประกอบ 44 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A



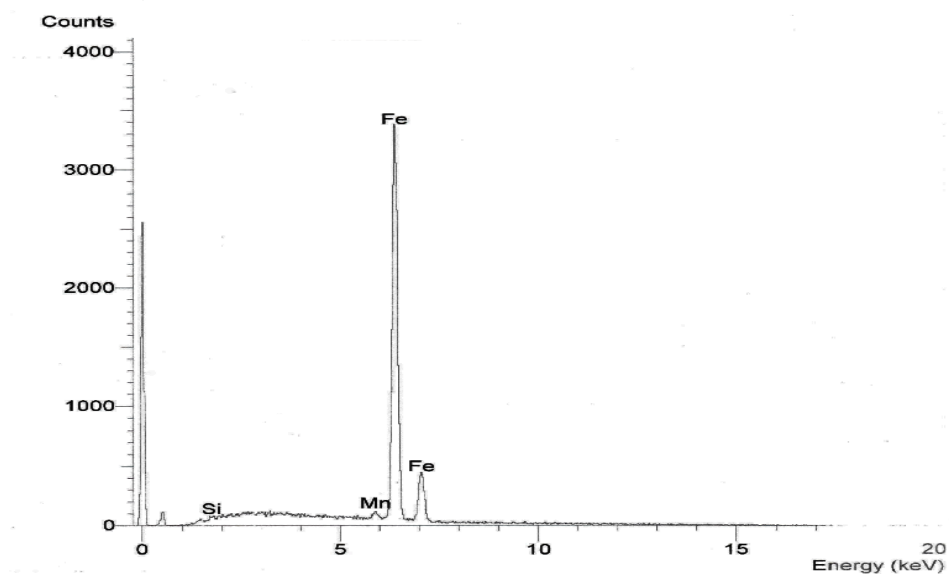
ภาพประกอบ 45 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A



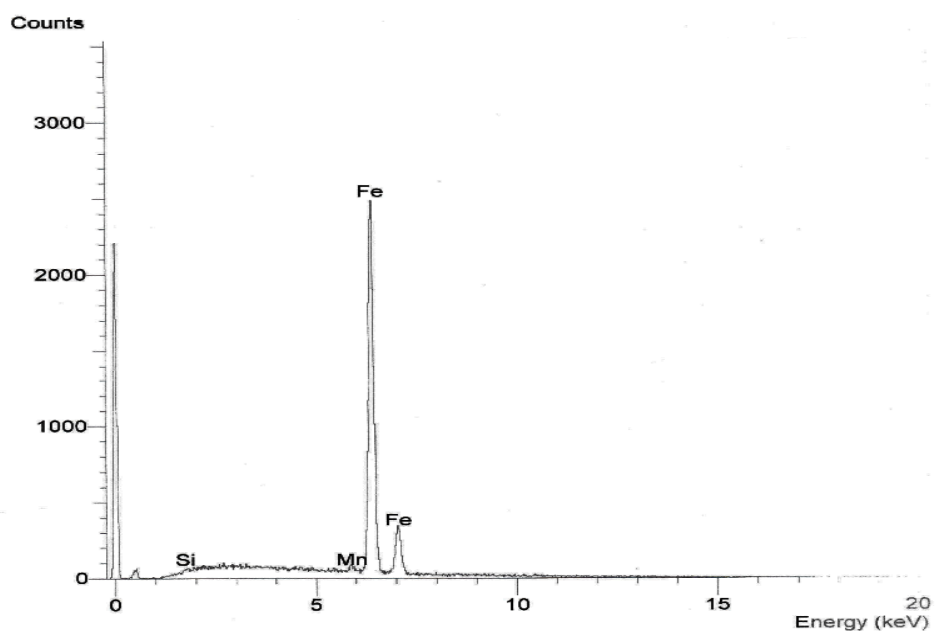
ภาพประกอบ 46 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A



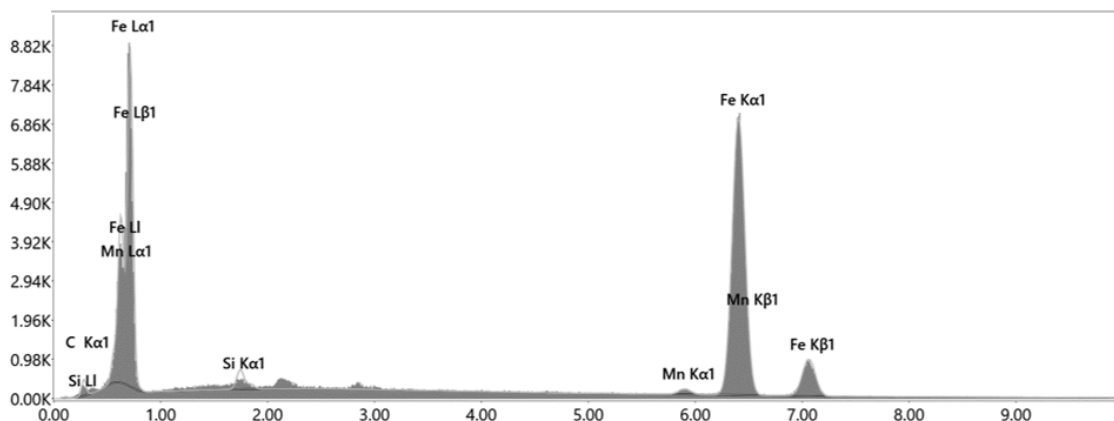
ภาพประกอบ 47 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A



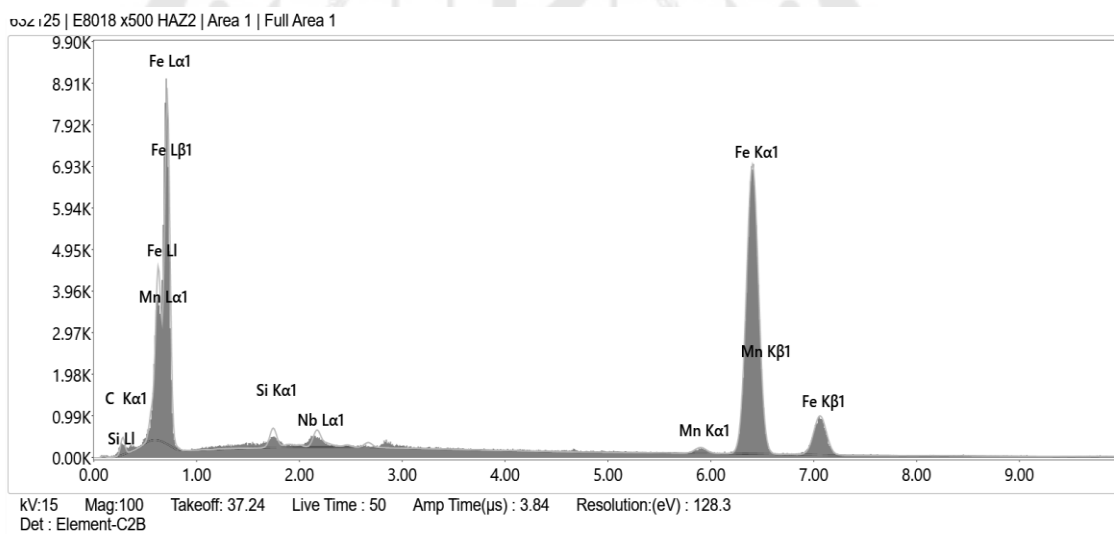
ภาพประกอบ 48 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A



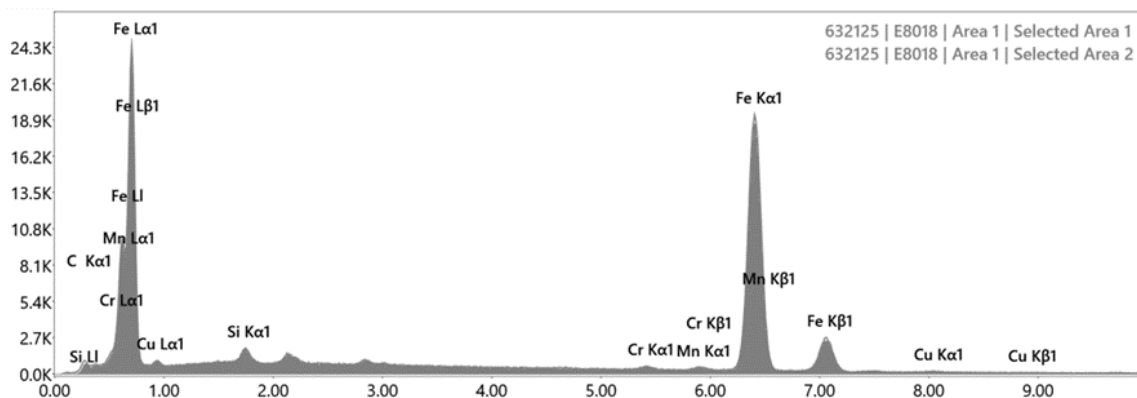
ภาพประกอบ 49 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเฟสภายในบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A



ภาพประกอบ 50 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ภายในบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 ที่กำลังไฟฟ้า 110 แอมแปร์



ภาพประกอบ 51 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ภายในบริเวณโลหะบริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 ที่กำลังไฟฟ้า 110 แอมแปร์



ภาพประกอบ 52 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ภายในบริเวณโลหะบริเวณแนวเชื่อม(FZ)ที่

4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

เพื่อให้ทราบถึงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบที่ไม่มีกระบวนการเชื่อมและมีกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 และ E8018 ที่กระแสไฟฟ้า 90 และ 110 แอมแปร์ ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) โดยบริเวณที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคมีดังนี้

4.3.1 บริเวณแนวเชื่อม (FZ)

4.3.2 ระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ)

4.3.3 บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ)

4.3.4 ระหว่างบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) กับ บริเวณโลหะฐาน (BM)

4.3.5 บริเวณโลหะฐาน (BM)

4.3.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม (FZ)

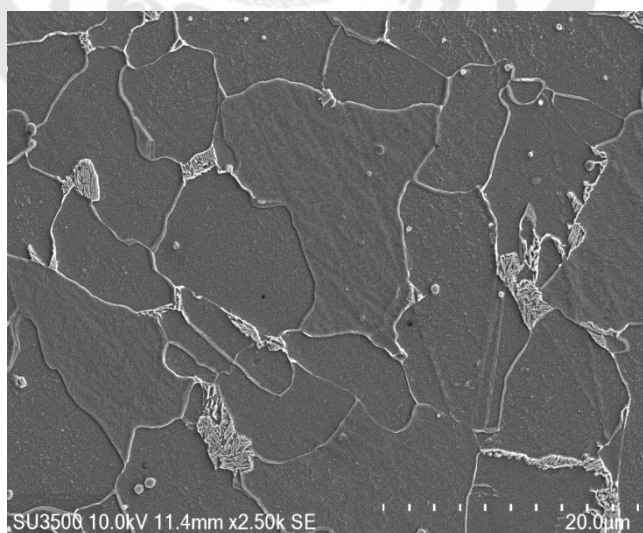
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 ด้วยกำลังไฟฟ้า 90, 110 แอมแปร์ และลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 ซึ่งบริเวณแนวเชื่อมนี้เกิดการหลอมละลายของลวดเชื่อมเพื่อทำการเชื่อมให้แผ่นโลหะทั้งสองติดกัน ดังนั้นบริเวณแนวเชื่อมนี้จะเป็นบริเวณที่ได้รับความร้อนสูงจนทำให้โครงสร้างของโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลง



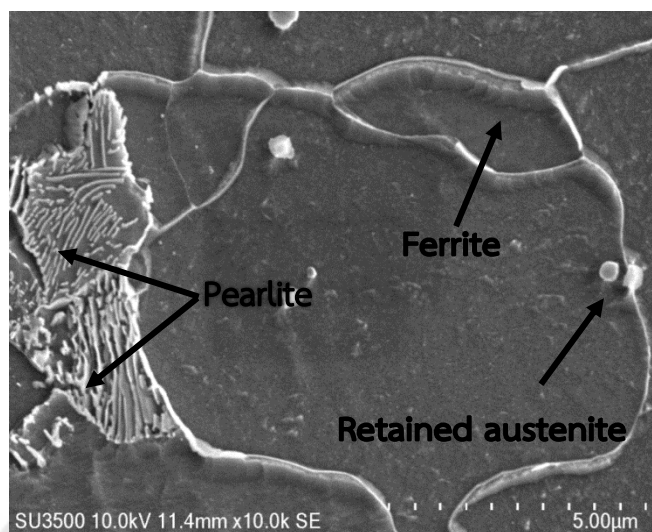
ภาพประกอบ 53 แสดงตำแหน่งตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม (FZ)

4.3.1.1 เชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018

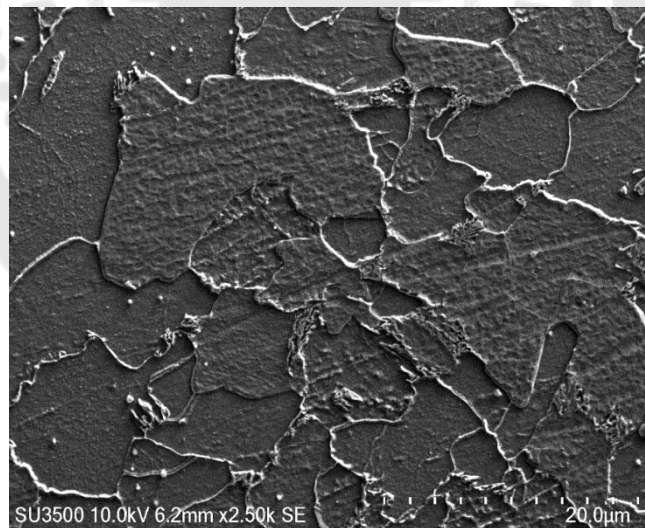
จากภาพประกอบ 54 และ 57 เป็นที่สังเกตได้ว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A และ 110 A ตามลำดับ ซึ่งบริเวณรอยเชื่อมนี้เกิดการหลอมละลายของลวดเชื่อมเพื่อทำการเชื่อมให้แผ่นโลหะทั้งสองติดกัน ดังนั้นบริเวณรอยเชื่อมนี้จะเป็นบริเวณที่ได้รับความร้อนสูงจนทำให้โครงสร้างของโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลง พบว่ามีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) เป็นโครงสร้างพื้นฐาน (Matrix) โครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) และมีการกระจายตัวของออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained austenite) อยู่ทั่วบริเวณ สังเกตได้ว่าเกรนของผิวโลหะบริเวณแนวเชื่อม (FZ) นั้นมีขนาดใหญ่ เนื่องจากได้รับความร้อนที่สูงทำให้เกรนเกิดการขยายตัว เมื่อเทียบกับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) บริเวณโลหะฐาน (BM) จะสังเกตเห็นว่าโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ในบริเวณนี้มีปริมาณน้อยที่สุด(6)



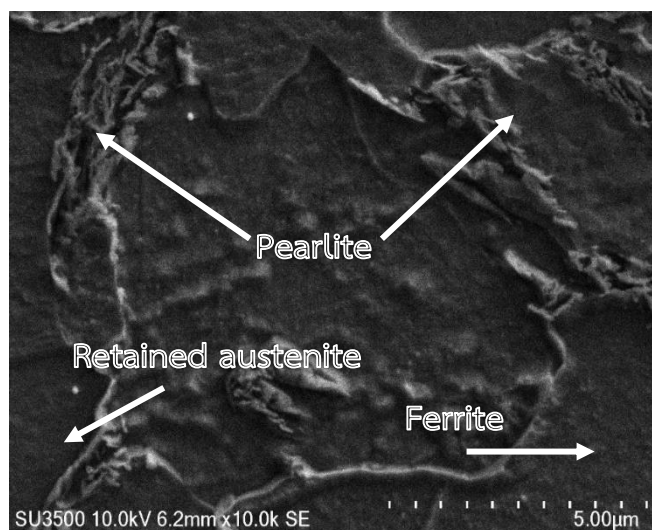
ภาพประกอบ 54 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 2500x



ภาพประกอบ 55 ประเภทของโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 10000x



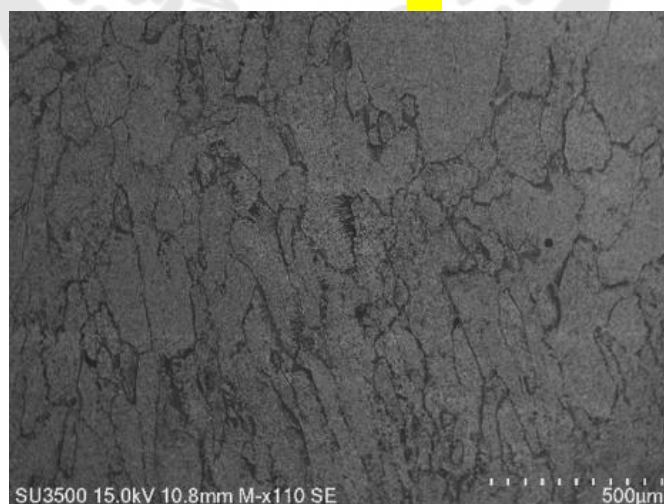
ภาพประกอบ 56 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A



ภาพประกอบ 57 ประเภทโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วย กระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 10000x

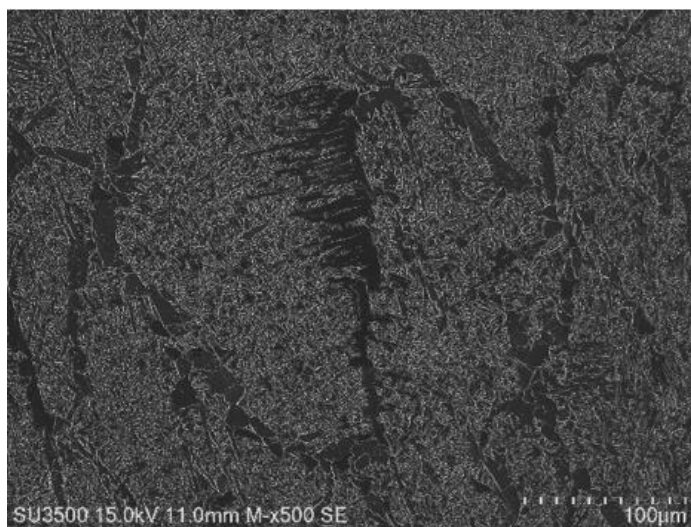
4.3.1.2 เชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018

จากภาพประกอบ 58, 59 และ 60 พบว่ามีโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) เป็นโครงสร้างพื้นฐานและมีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) อยู่เป็นริ้วยาวทั่วบริเวณแนวเชื่อมและมี ออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained austenite) ในปริมาณที่น้อย ซึ่งการที่มีโครงสร้างเพิร์ลไลต์เป็น โครงสร้างพื้นฐาน จะทำให้ลวดเชื่อมชนิดนี้มีความแข็ง(8)

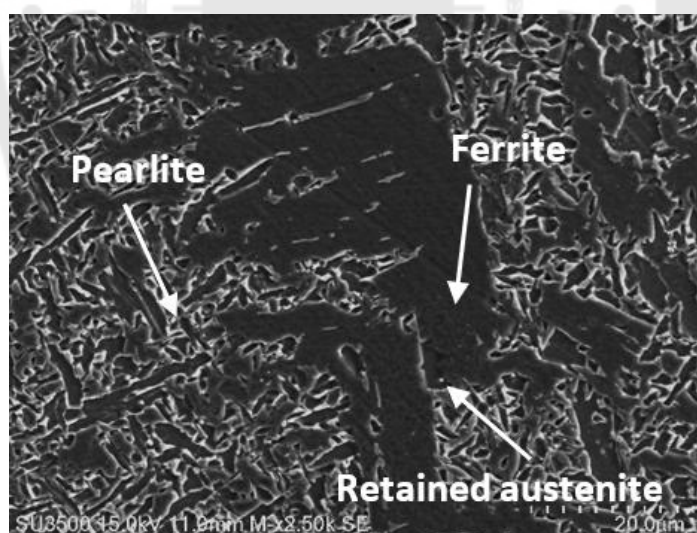


ภาพประกอบ 58 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า

E8018



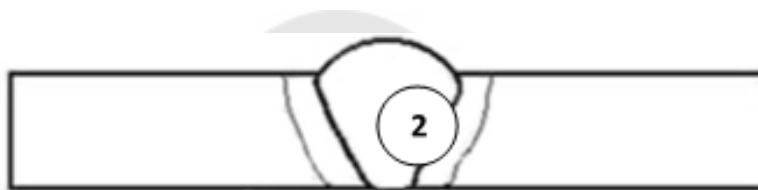
ภาพประกอบ 59 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018



ภาพประกอบ 60 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018

4.3.2 โครงสร้างระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ)

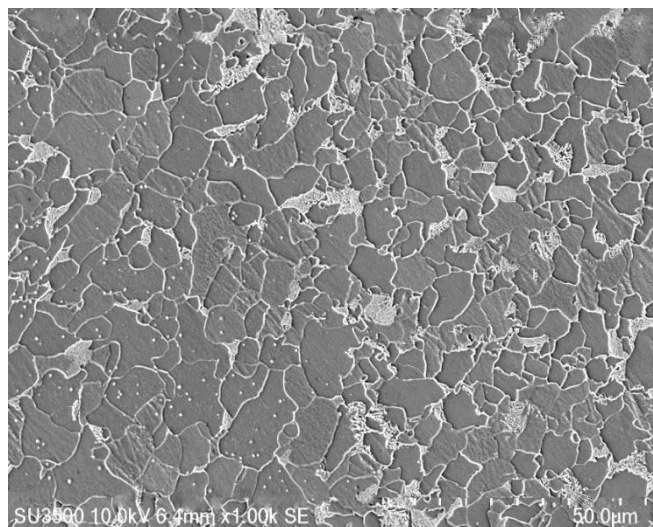
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในส่วนองโครงสร้างระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 ด้วยกำลังไฟฟ้า 90, 110 แอมแปร์ และ E8018 ด้วยกำลังไฟฟ้า 9110 แอมแปร์ สามารถสังเกตเห็นได้ว่าที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้ร้อนนั้นอยู่ตรงกลางระหว่างบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณโลหะฐานจึงทำให้ได้รับความร้อนที่สูง และที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้ร้อนนั้นเกิดการคายความร้อนได้สองทิศทางคือกระจายความร้อนไปยังบริเวณโลหะฐานและระบายความร้อนให้กับอากาศโดยรอบทำให้เกิดอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าบริเวณแนวเชื่อม(3)



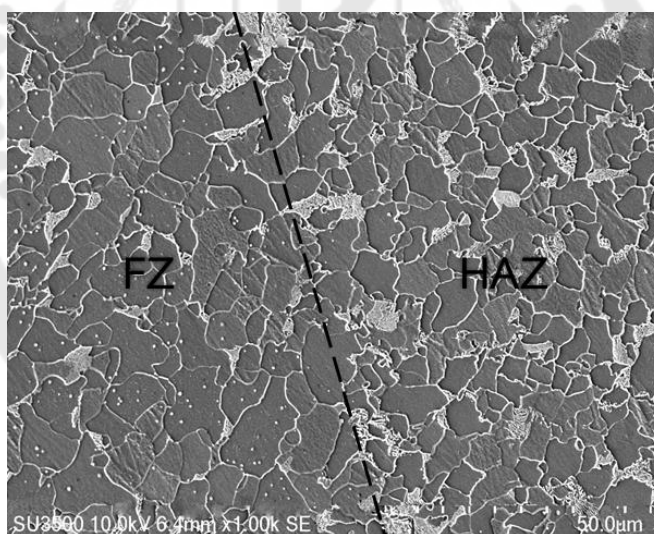
ภาพประกอบ 61 แสดงตำแหน่งตรวจสอบโครงสร้างระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ)

4.3.2.1 เชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018

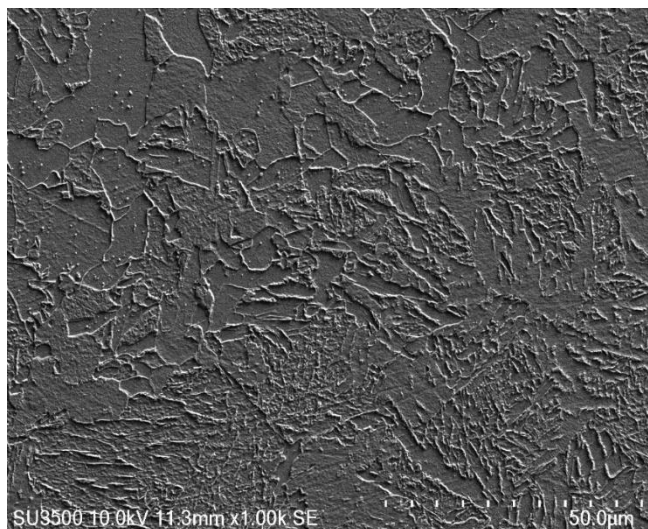
จากภาพประกอบ 62 และ 64 เป็นที่สังเกตเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ซึ่งเมื่อสังเกตเห็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) จะเห็นว่าขนาดเกรนบริเวณนี้มีความละเอียดมากกว่าบริเวณแนวเชื่อม (FZ) เนื่องจากบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) นั้นอยู่ตรงกลางระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) และบริเวณโลหะฐาน (BM) ทำให้ได้รับความร้อนสูงจากบริเวณแนวเชื่อม (FZ) และเกิดการคายความร้อนให้ทั้งบริเวณโลหะฐาน (BM) และอากาศโดยรอบทำให้เกิดอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าบริเวณแนวเชื่อม (FZ) จึงส่งผลกระทบต่อให้ขนาดเกรนมีความละเอียดกว่าบริเวณแนวเชื่อม พบว่าในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) จะมีโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) มากกว่าบริเวณแนวเชื่อม (FZ) แต่จะมีเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained austenite) น้อยกว่า



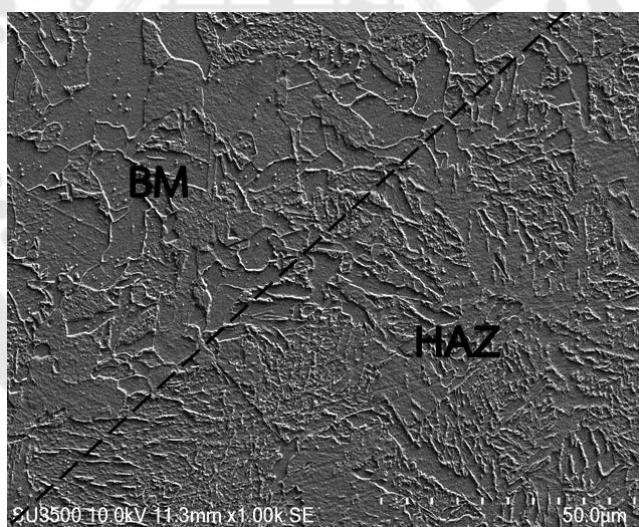
ภาพประกอบ 62 โครงสร้างจุลภาคระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 1000x



ภาพประกอบ 63 ความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 1000x



ภาพประกอบ 64 โครงสร้างจุลภาคระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 1000x

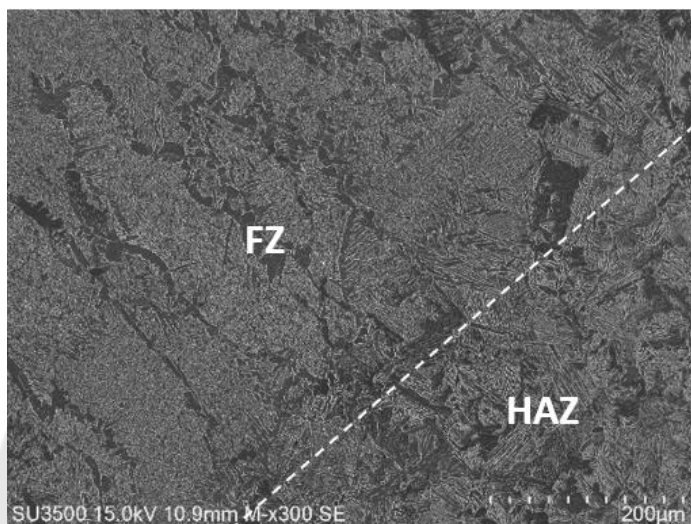


ภาพประกอบ 65 ความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 1000x

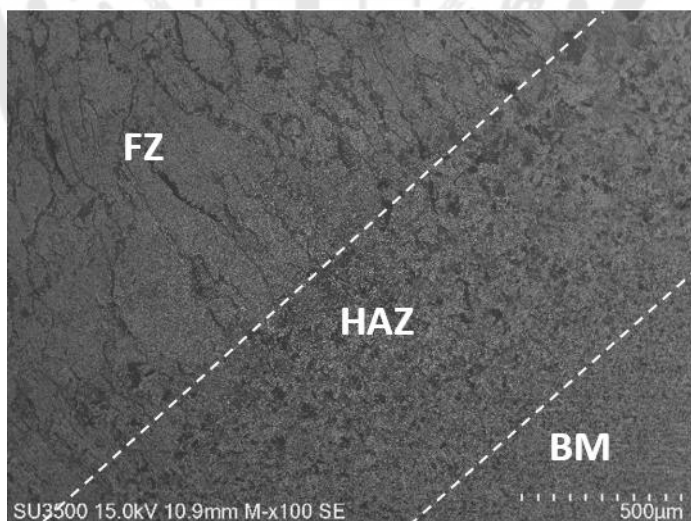
4.3.2.2 เชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018

พบว่าที่บริเวณแนวเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมีความแตกต่างของโครงสร้างเฟอไรต์อย่างชัดเจน ที่บริเวณแนวเชื่อมจะมีเฟอไรต์ในปริมาณที่

น้อยและมีการเรียงตัวโครงสร้างเป็นริ้ว แต่ที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนนั้น โครงสร้างเพอร์ไรต์จะมีการกระจายตัวไปทั่วบริเวณ ซึ่งมีปริมาณของโครงสร้างเพิร์ลไลต์ที่ใกล้เคียงกัน



ภาพประกอบ 66 โครงสร้างระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ กำลังขยาย 300 เท่า



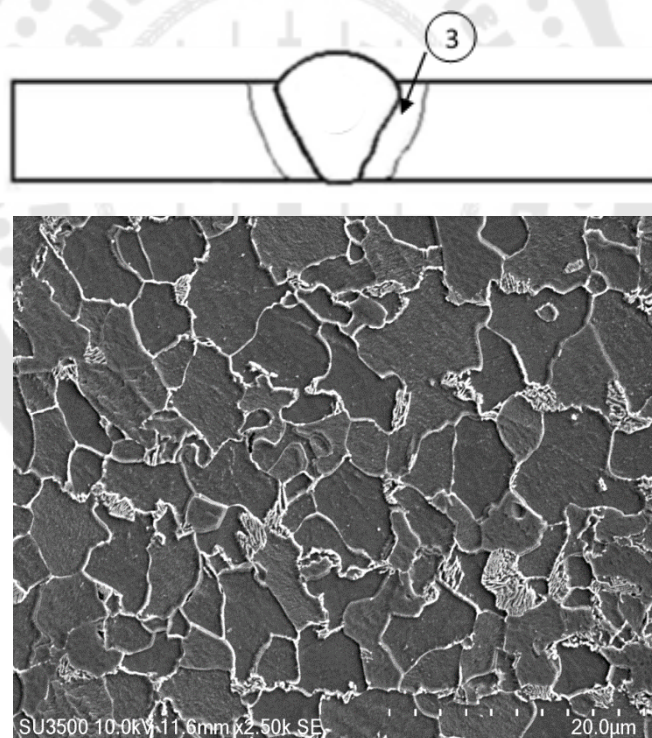
ภาพประกอบ 67 โครงสร้างระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการและโครงสร้างบริเวณโลหะฐาน (BM) เชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ กำลังขยาย 300 เท่า

4.3.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ)

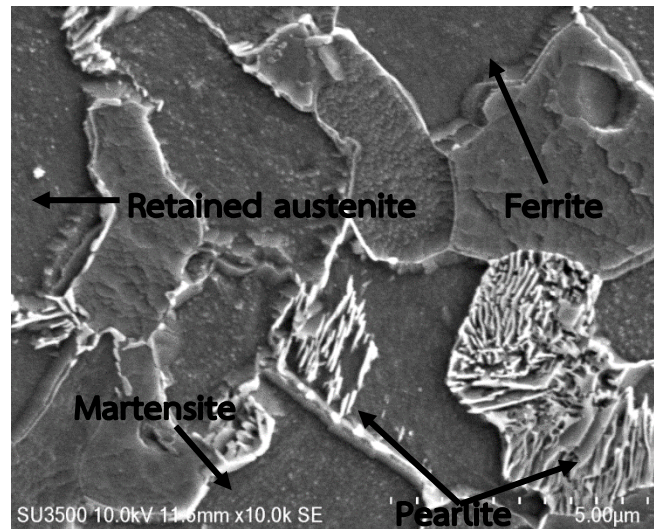
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 และ E8018 ด้วยกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ โดยที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบความรอนั้นมีการคายความร้อนที่เร็ว ทำให้ที่บริเวณนี้พบมาร์เทนไซต์ (Martensite) อยู่บ้าง

4.3.3.1 เชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018

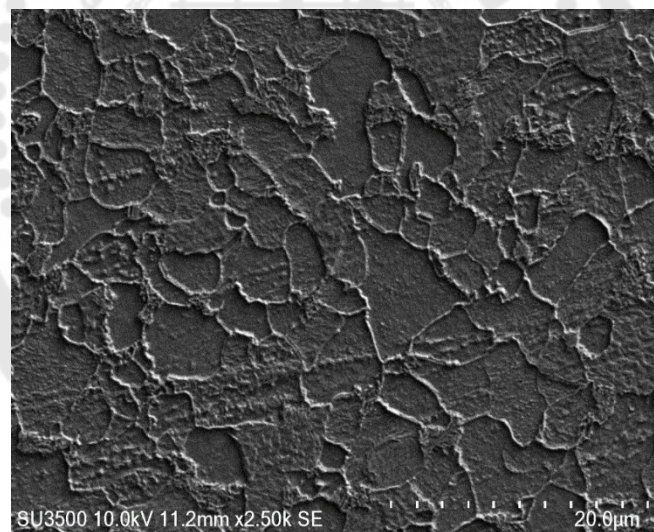
จากภาพประกอบ 69 และ 71 เป็นที่สังเกตได้ว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) จะพบว่ามีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) เป็นโครงสร้างพื้นฐาน (Matrix) เพิร์ลไลต์ (Pearlite) และยังพบมาร์เทนไซต์ (Martensite) ในบางบริเวณ อีกทั้งยังมีการกระจายตัวของออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained austenite) อยู่เล็กน้อย ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) มีขนาดเกรนที่ละเอียดกว่าบริเวณอื่นๆ



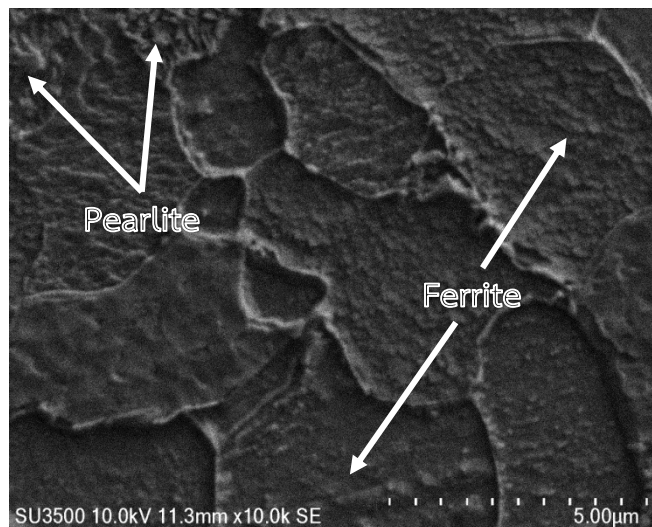
ภาพประกอบ 68 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 2500x



ภาพประกอบ 69 ประเภทของโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแส



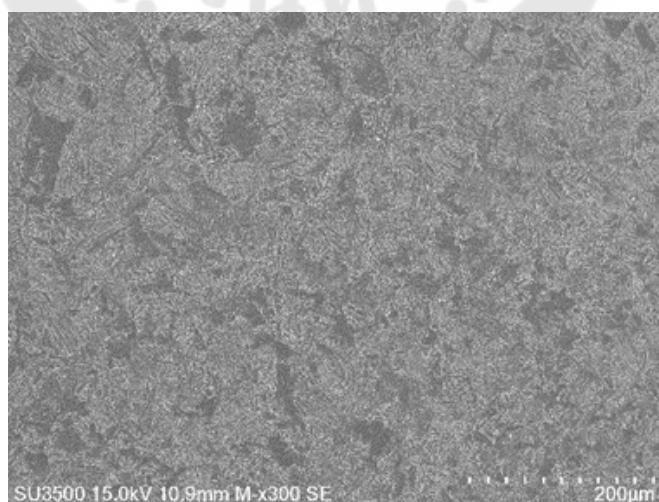
ภาพประกอบ 70 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 2500x



ภาพประกอบ 71 ประเภทของโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 10000x

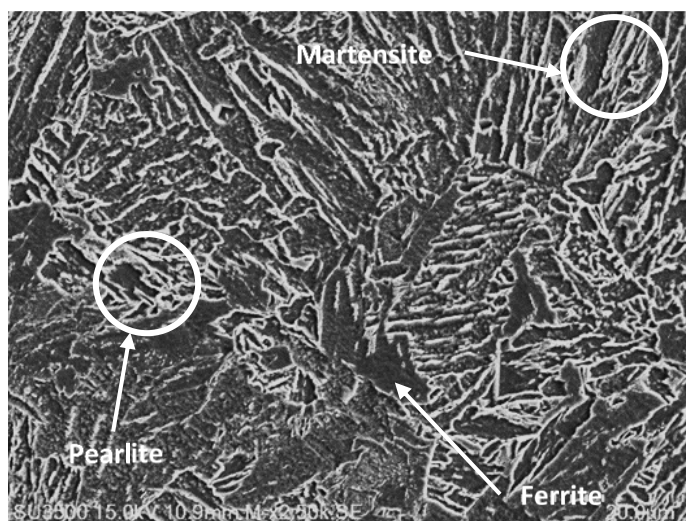
4.3.3.2 เชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018

ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 ด้วยกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ พบว่ามีโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) เป็นโครงสร้างพื้นฐาน เฟอร์ไรต์ (Ferrite) และยังมีออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained austenite) กระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณ อีกทั้งยังพบมาร์เทนไซต์ (Martensite) ในบางบริเวณซึ่งจะทำให้บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนนี้มีความแข็งและเปราะ



ภาพประกอบ 72 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ กำลังขยาย 300

เท่า



ภาพประกอบ 73 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ กำลังขยาย 2500 เท่า

4.3.4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะฐาน (BM)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 และ E8018 ด้วยกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ จะสังเกตเห็นได้ว่าโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ของทั้งสองบริเวณมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

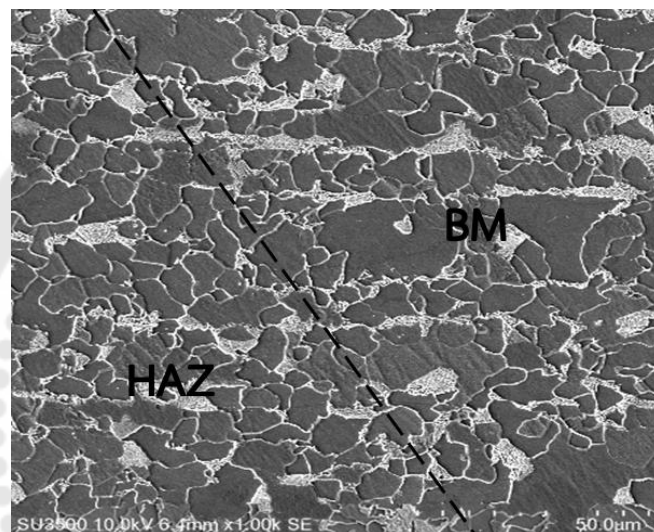


ภาพประกอบ 74 แสดงตำแหน่งตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะฐาน (BM)

4.3.4.1 เชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018

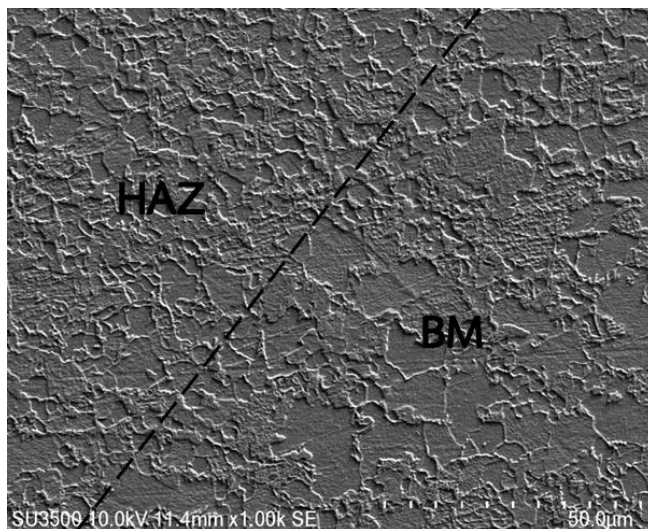
จากภาพประกอบ 75 และ 76 เป็นที่สังเกตเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคระหว่างบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะฐาน (BM) ทั้งสองบริเวณจะมีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite) แต่จะมีปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งในบริเวณที่

ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) จะมีโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) มากกว่าเฟอร์ไรต์ (Ferrite) พบมาร์เทนไซต์ (Martensite) ในบางบริเวณและมีการกระจายตัวของออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained austenite) อยู่เล็กน้อย ในขณะที่บริเวณโลหะฐาน (BM) จะมีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) มากกว่าเพิร์ลไลต์ (Pearlite) แต่ไม่พบมาร์เทนไซต์ (Martensite) และออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained austenite) และพบว่าขนาดเกรนของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) จะมีความละเอียดกว่าเกรนของบริเวณโลหะฐาน (BM)



ภาพประกอบ 75 ความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคระหว่างบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย

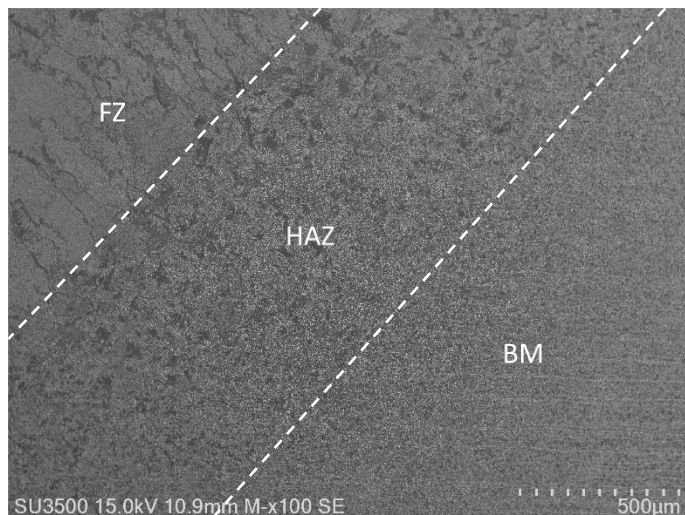
1000x



ภาพประกอบ 76 ความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคระหว่างบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความ
ร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A
กำลังขยาย 1000x

4.3.4.2 เชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018

จากภาพประกอบ 77 จะสังเกตได้ว่าที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความ
ร้อน (HAZ) จะมีโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) มากกว่าและพบมาร์เทนไซต์ (Martensite)
กระจายตัวอยู่เป็นจำนวนมากมีการกระจายตัวของออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained austenite) อยู่
เล็กน้อย ในขณะที่บริเวณโลหะฐาน (BM) จะมีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) มากกว่า แต่ไม่พบมาร์
เทนไซต์ (Martensite)



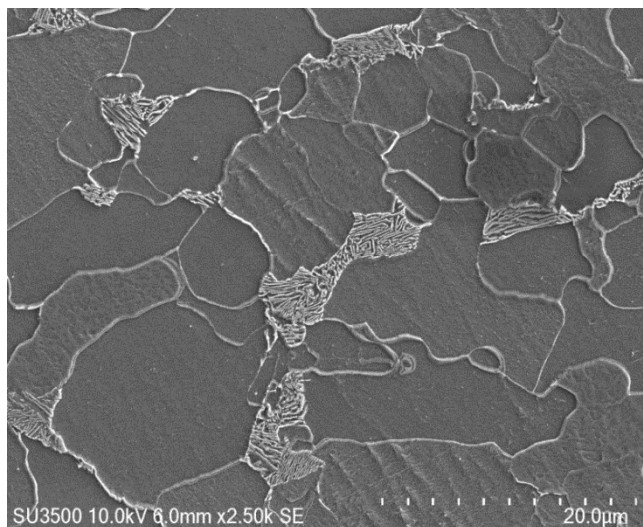
ภาพประกอบ 77 โครงสร้างระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการและโครงสร้างบริเวณโลหะฐาน (BM) ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018

4.3.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐาน (BM)

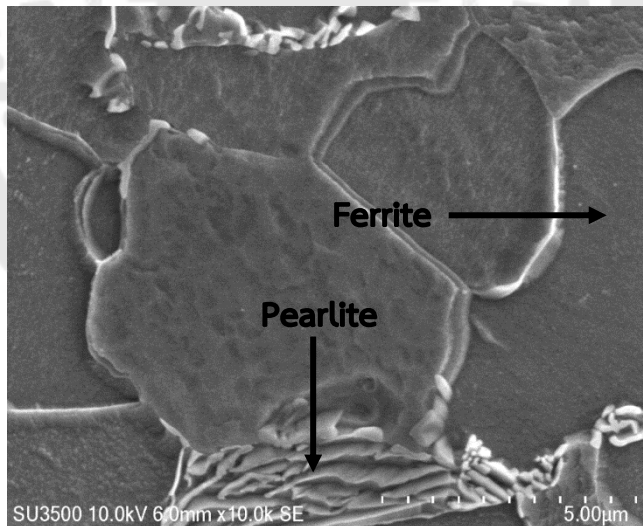
4.3.5.1 ด้วยลวดเชื่อม E7018

จากภาพประกอบ 79 และ 81 เป็นที่สังเกตได้ว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐาน (BM) พบว่ามีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite) เป็นโครงสร้างของเหล็กกล้า A572GR50 ซึ่งลักษณะเกรนมีความละเอียดเมื่อเทียบกับโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) แต่มีความหยาบเมื่อเทียบกับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ดังนั้นค่าความแข็งในบริเวณโลหะฐาน (BM) จึงส่งผลให้มีค่าสูงกว่าบริเวณแนวเชื่อม (FZ) แต่มีค่าความแข็งต่ำกว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) และเมื่อเทียบกับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) บริเวณนี้จะไม่พบโครงสร้างออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained austenite)

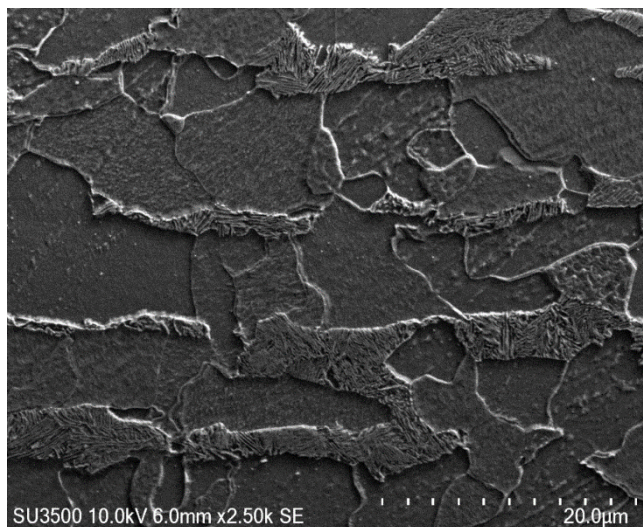




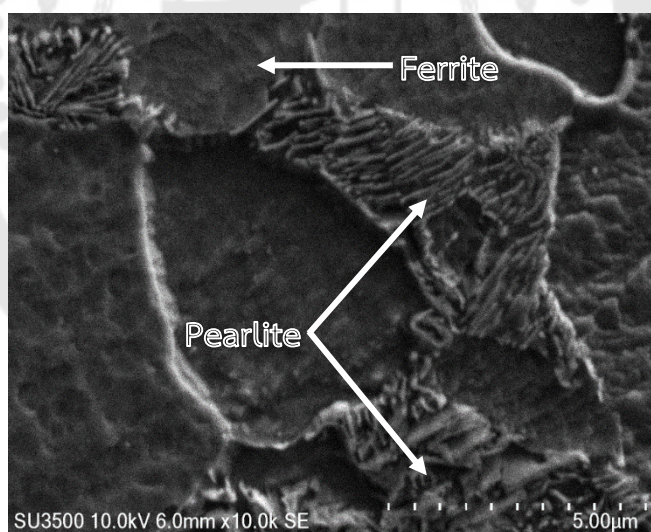
ภาพประกอบ 78 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วย กระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 2500x



ภาพประกอบ 79 ประเภทของโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม ด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 10000x



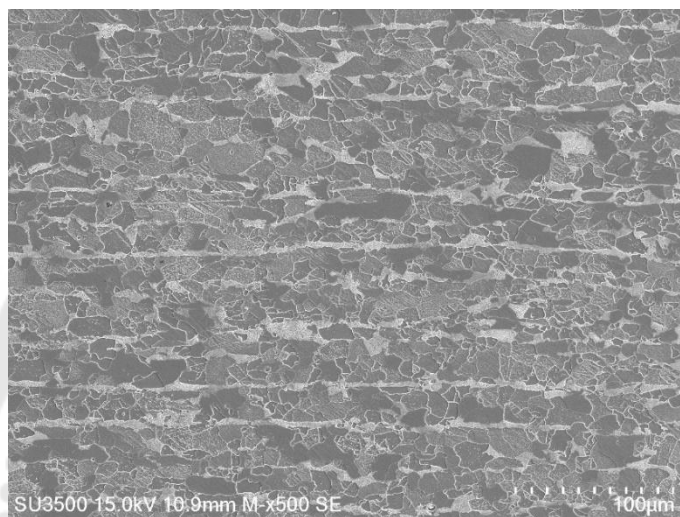
ภาพประกอบ 80 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วย กระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 2500x



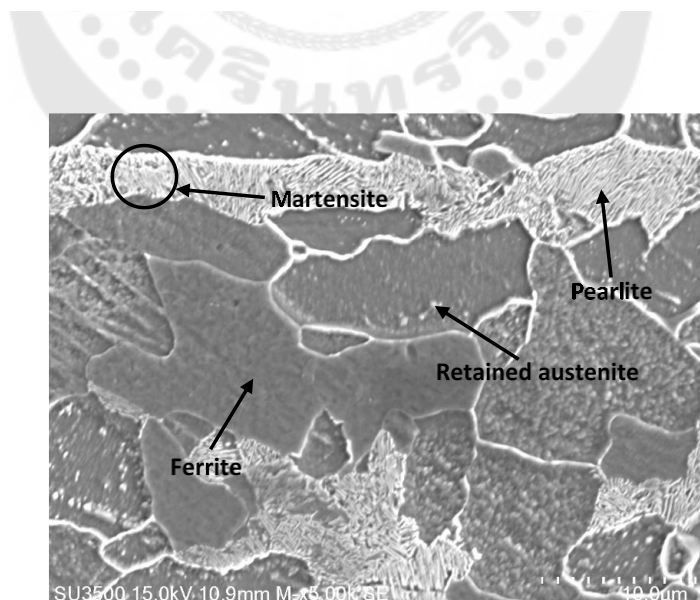
ภาพประกอบ 81 ประเภทของโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม ด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 10000x

4.3.5.1 ด้วยลวดเชื่อม E8018

จากรูปจะพบว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐาน (BM) มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) เป็นโครงสร้างพื้นฐาน (Matrix) และมีโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) เรียงเป็นแนวยาว อีกทั้งยังมีออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained austenite) กระจายตัวอยู่เล็กน้อย ซึ่งเป็นโครงสร้างของเหล็กกล้า A572GR50



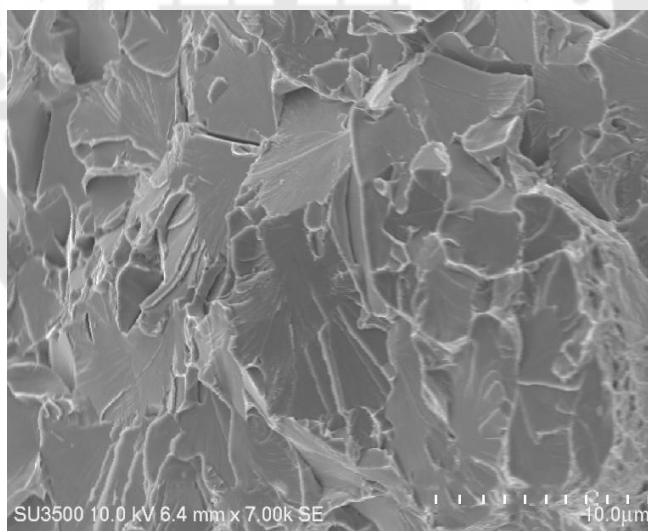
ภาพประกอบ 82 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ กำลังขยาย 500 เท่า



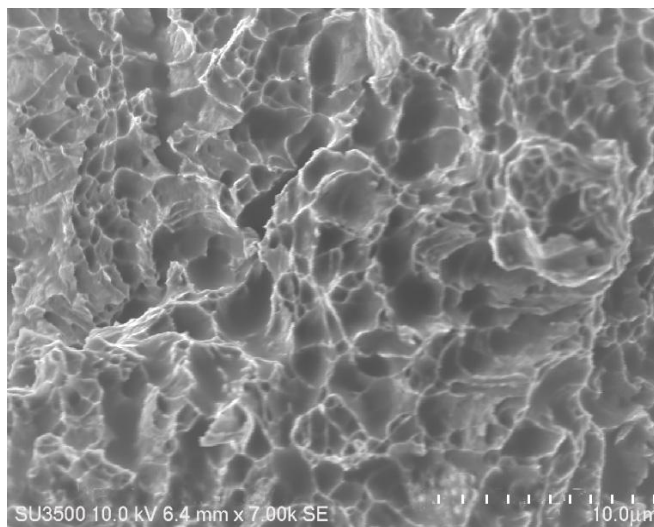
ภาพประกอบ 83 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ กำลังขยาย 5000 เท่า

4.3.6 การวิเคราะห์รอยแตกหักของโลหะเชื่อมบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ระดับจุลภาค

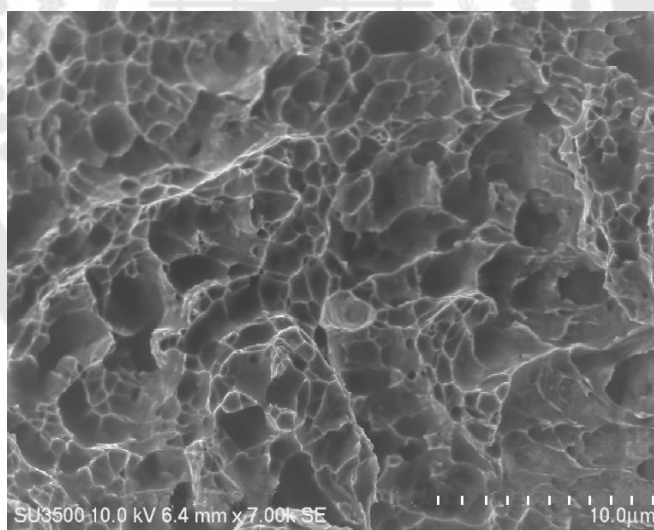
จากภาพประกอบ 84 85 และ 86 เป็นการแตกหักของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านการเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A และ 110 A ตามลำดับ ที่ผ่านการทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี ทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) เพื่อวิเคราะห์รอยแตกหักระดับจุลภาค รอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านการเชื่อมจะเห็นว่ามียอยแตกแบบผ่าเข้าไปในบริเวณเกรนเกิดขึ้น เรียกว่า การแตกหักแบบเปราะ (Brittle fracture) ดังแสดงในภาพประกอบ 84 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเนื้อโลหะเดิมของเหล็ก A572GR50 นั้นมีความแข็งแต่เปราะ เนื่องจากมีโครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ที่มีปริมาณมากเมื่อเทียบกับบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ส่วนการแตกหักของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A และ 110 A ที่บริเวณแนวเชื่อม (FZ) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการแตกหักตามขอบเกรน เรียกว่า การแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture) เนื่องจากบริเวณแนวเชื่อม (FZ) นั้นมีอัตราการเย็นตัวช้าทำให้เนื้อโลหะบริเวณนี้มีความเหนียว (Toughness) จึงไม่เกิดการแตกแบบเปราะ ดังแสดงในภาพประกอบ 84 และ 85 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 84 รอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านการเชื่อมบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ระดับจุลภาคกำลังขยาย 7000x



ภาพประกอบ 85 รอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A บริเวณแนวเชื่อม (FZ) ระดับจุลภาค กำลังขยาย 7000x



ภาพประกอบ 86 รอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A บริเวณแนวเชื่อม (FZ) ระดับจุลภาค กำลังขยาย 7000x

4.4 การวิเคราะห์ขนาดเกรน

แสดงให้เห็นถึงขนาดเกรนของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 และ E7018 ด้วยกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ การวัดขนาดเกรนด้วย

ซอฟต์แวร์ Axio 2.1 มาตรฐาน ASTM E1382 โดยการวิเคราะห์ใช้วิธี Intercept Method โดยรูปแบบคอร์ด (Chord) เป็นแบบ Combined Chord ซึ่งจะหาขนาดเกรนที่บริเวณต่าง ๆ ดังนี้

4.4.1. บริเวณแนวเชื่อม (FZ)

4.4.2. บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ)

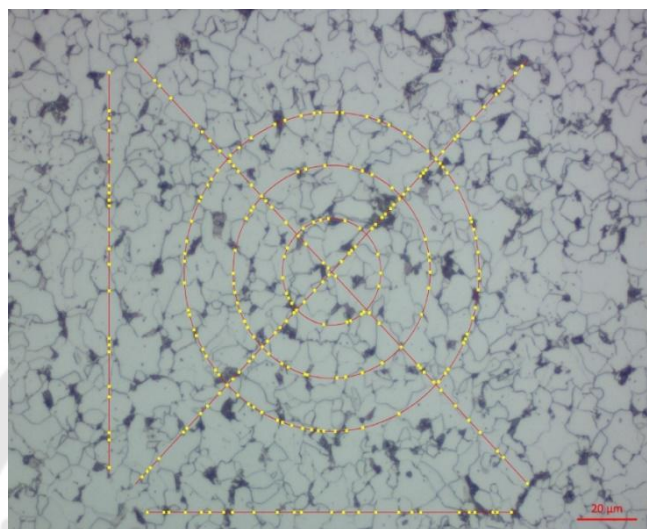
4.4.3. บริเวณโลหะฐาน (BM)

4.4.1 บริเวณแนวเชื่อม (FZ)

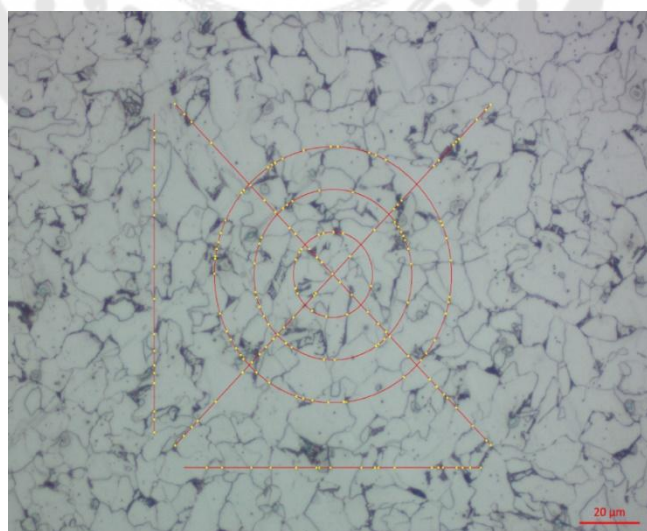
ขนาดเกรนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 และ E8018 ที่กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์นั้น ขนาดของเกรนมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก เนื่องจากโครงสร้างพื้นฐานของลวดเชื่อมทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกัน

4.4.1.1 ลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018

จากภาพประกอบ 87 และ 88 เป็นที่สังเกตได้ว่าขนาดเกรนบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A และ 110 A ซึ่งสามารถประเมินขนาดเกรนมีค่าเท่ากับ 10.8 และ 11.9 μm ตามลำดับ โดยขนาดเกรนของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A มีขนาดเกรนที่ใหญ่กว่าชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A เนื่องจากได้รับความร้อนป้อนเข้า (Heat Input) และกระแสไฟฟ้าเชื่อมที่ให้กับชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A สูงกว่า 90 A ทำให้อัตราการเย็นตัวช้ากว่าเมื่ออยู่ในอุณหภูมิเดียวกัน โดยมีผลต่อสมบัติทางกลภายหลังจากการเชื่อมในด้านความแข็งซึ่งความร้อนสะสมจะทำให้โลหะมีความแข็งและเปราะกว่า เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะ(17)



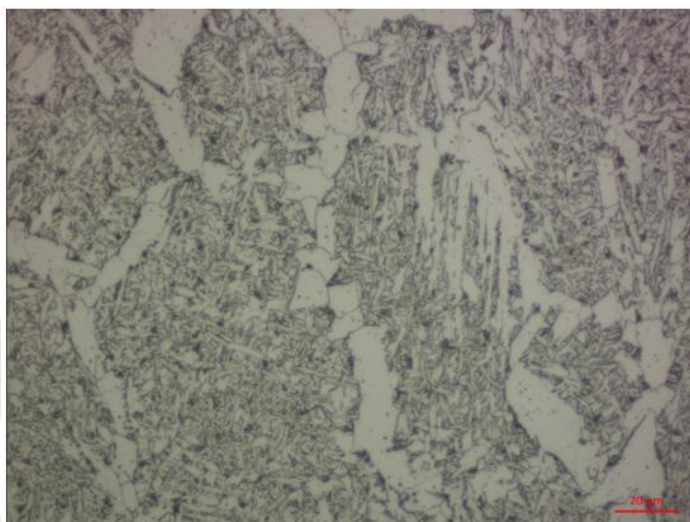
ภาพประกอบ 87 Intercept Method หาขนาดเกรนบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 500x



ภาพประกอบ 88 Intercept Method หาขนาดบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 500x

4.4.1.2 ลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018

ลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 จะมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นโครงสร้างเพิร์ลไลต์ซึ่งจะมีการเย็นตัวเร็ว ส่งผลให้มีขนาดเกรนที่เล็ก โดยจากรูป 117 ไม่สามารถระบุขนาดของเกรนได้ เนื่องจากมีโครงสร้างที่เล็กมาก



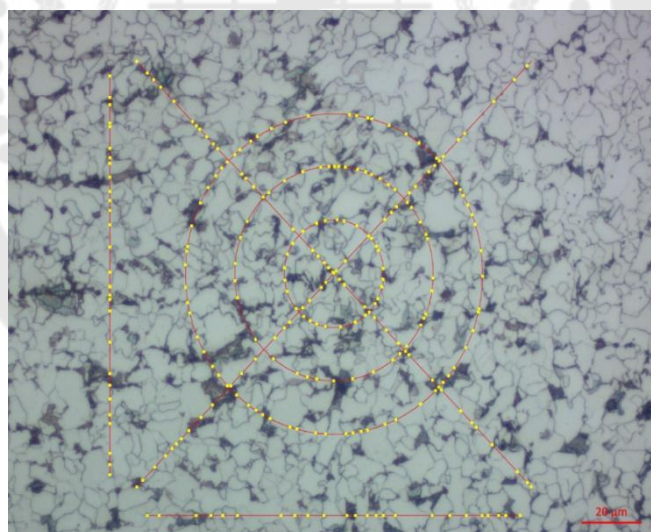
ภาพประกอบ 89 ขนาดเกรนบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า

4.4.2 บริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (HAZ)

4.4.2.1 ลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018

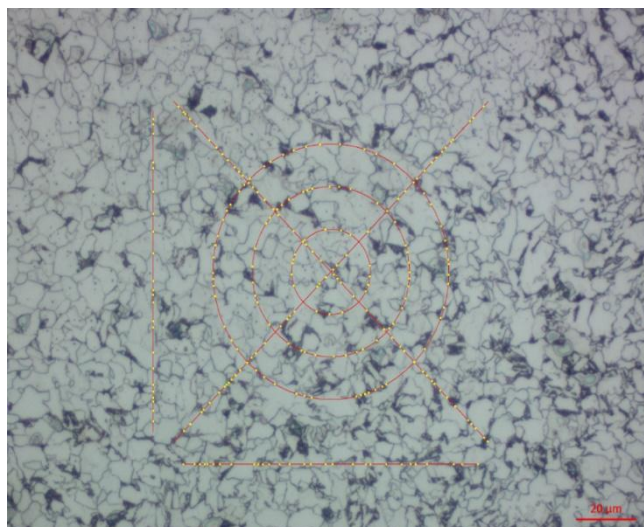
จากภาพประกอบ 90 และ 91 เป็นที่สังเกตได้ว่าขนาดเกรนบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A และ 110 A ซึ่งสามารถประเมินขนาดเกรนมีค่าเท่ากับ 10.8 และ 11.9 μm ตามลำดับ โดยขนาดเกรนของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A มีขนาดเกรนที่ใหญ่กว่าชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A เนื่องจากได้รับความร้อนป้อนเข้า (Heat Input) และกระแสไฟฟ้าเชื่อมที่ให้กับชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A สูงกว่า 90 A ทำให้อัตราการเย็นตัวช้ากว่าเมื่ออยู่ในอุณหภูมิเดียวกัน โดยมีผลต่อสมบัติทางกลภายหลังจากการเชื่อมในด้านความแข็งซึ่งความร้อนสะสมจะทำให้โลหะมีความแข็งและเปราะกว่า เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะจากภาพประกอบ 90 และ 91 เป็นที่สังเกตได้ว่าขนาดเกรนระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ของ

ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A และ 110 A ซึ่งสามารถประเมินขนาดเกรนมีค่าเท่ากับ 12.1 และ 12.6 μm ตามลำดับ โดยขนาดเกรนของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A มีขนาดเกรนที่ใหญ่กว่าชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A เพียงเล็กน้อย เนื่องจากได้รับผลกระทบจากความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณแนวเชื่อม (FZ) โดยความร้อนป้อนเข้า (Heat Input) และกระแสไฟฟ้าเชื่อมที่ให้กับชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A สูงกว่า 90 A ทำให้อัตราการเย็นตัวช้ากว่าเมื่ออยู่ในอุณหภูมิเดียวกัน โดยมีผลต่อสมบัติทางกลภายหลังจากการเชื่อมในด้านความแข็งซึ่งความร้อนสะสมจะทำให้โลหะมีความแข็งและเปราะกว่า เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะ



ภาพประกอบ 90 Intercept Method หาขนาดเกรนระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย

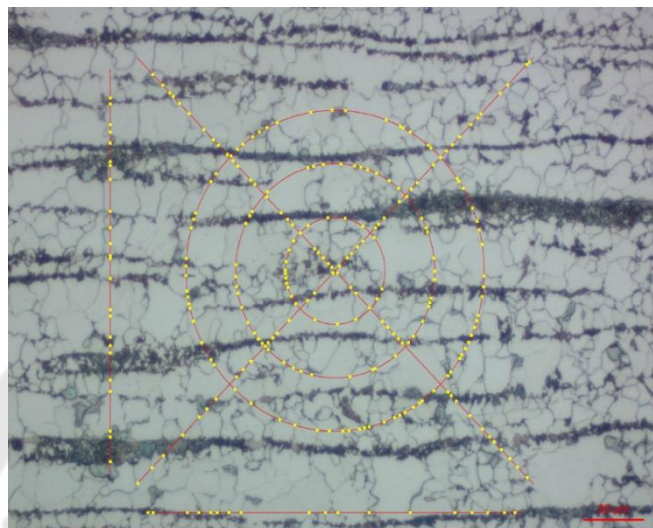
500x



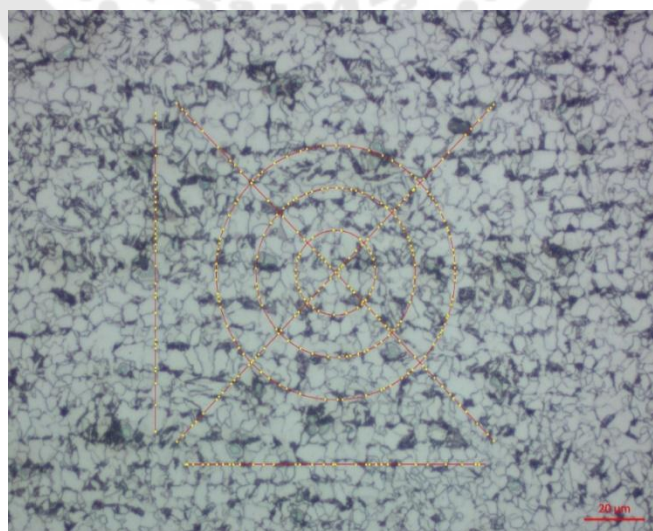
ภาพประกอบ 91 Intercept Method หาขนาดเกรนระหว่างบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 500x

4.4.3 ขนาดบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ)

จากภาพประกอบ 92 และ 93 เป็นที่สังเกตได้ว่าขนาดเกรนบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A และ 110 A ซึ่งสามารถประเมินขนาดเกรนมีค่าเท่ากับ 12.2 และ 13.3 μm ตามลำดับ โดยขนาดเกรนของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A มีขนาดเกรนที่ใหญ่กว่าชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A เนื่องจากได้รับผลกระทบจากความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณแนวเชื่อม (FZ) โดยความร้อนป้อนเข้า (Heat Input) และกระแสไฟฟ้าเชื่อมที่ให้กับชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A สูงกว่า 90 A ทำให้อัตราการเย็นตัวช้ากว่าเมื่ออยู่ในอุณหภูมิเดียวกัน โดยมีผลต่อสมบัติทางกลภายหลังจากการเชื่อมในด้านความแข็งซึ่งความร้อนสะสมจะทำให้โลหะมีความแข็งและเปราะกว่าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะ(18)



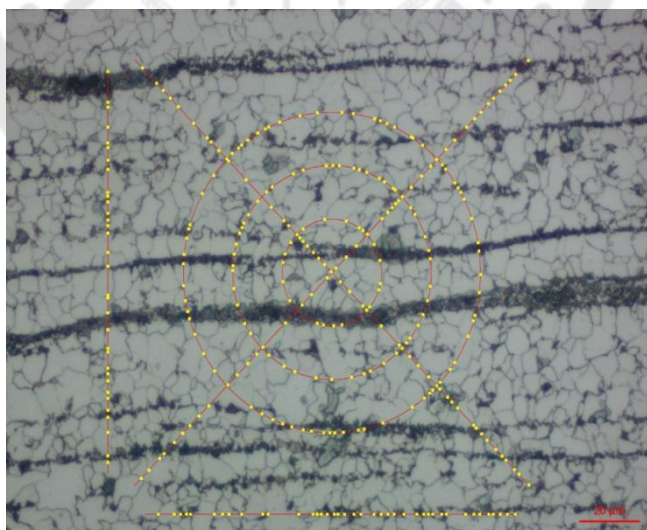
ภาพประกอบ 92 Intercept Method หาขนาดเกรนบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 500x



ภาพประกอบ 93 Intercept Method หาขนาดเกรนบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 500x

4.4.3.1 ขนาดเกรนระหว่างบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) และบริเวณ โลหะฐาน (BM)

จากภาพประกอบ 127 และ 129 เป็นที่สังเกตได้ว่าขนาดเกรนระหว่างบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) และบริเวณโลหะฐาน (BM) ของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A และ 110 A ซึ่งสามารถประเมินขนาดเกรนมีค่าเท่ากับ 12.5 และ 13.6 μm ตามลำดับ โดยขนาดเกรนของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A มีขนาดเกรนที่ใหญ่กว่า 90 A เนื่องจากในบริเวณแนวเชื่อม (FZ) มีความร้อนป้อนเข้า (Heat Input) และกระแสไฟฟ้าเชื่อมที่ให้กับชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A สูงกว่า 90 A ทำให้อัตราการเย็นตัวในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ช้ากว่าเมื่ออยู่ในอุณหภูมิเดียวกัน โดยมีผลต่อสมบัติทางกลภายหลังจากการเชื่อมในด้านความแข็งซึ่งความร้อนสะสมจะทำให้โลหะมีความแข็งและเปราะกว่า เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะ



ภาพประกอบ 94 Intercept Method หาขนาดเกรนระหว่างบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย

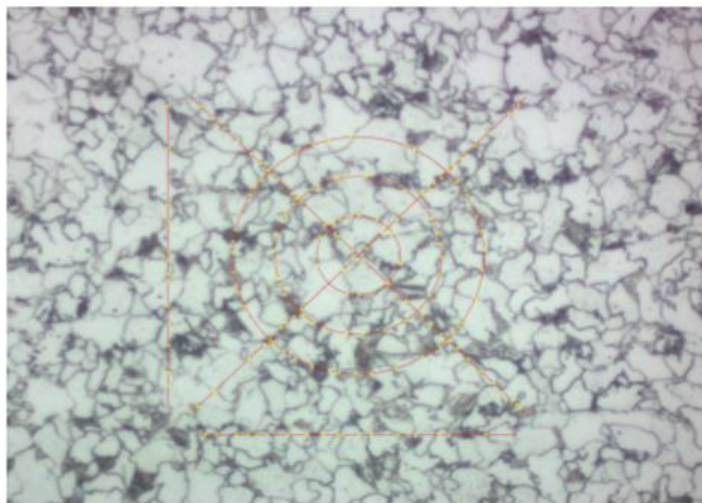
500x



ภาพประกอบ 95 Intercept Method หาขนาดเกรนระหว่างบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความ
ร้อน (HAZ) กับบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A
กำลังขยาย 500x

4.4.2.1 ลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018

บริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (HAZ) ขนาดเกรนของชิ้นงานทดสอบที่
ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 และ E8018 จะประเมินได้ว่ามีขนาดเกรน
เท่ากับ 13.3 และ 13.5 μm จากรูป จะสังเกตเห็นว่าขนาดเกรนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม
SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 และ E8018 จะมีขนาดที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากเป็นเหล็กชนิด
เดียวกัน อุณหภูมิที่ได้รับความร้อนไม่แตกต่างกันและขนาดของเกรนที่บริเวณนี้จะมีขนาดใหญ่
กว่าบริเวณอื่น เนื่องจากโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กชนิดนี้คือโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เมื่อได้รับความ
ร้อนจะมีการเย็นตัวค่อนข้างช้า อีกทั้งเป็นการได้รับความร้อนเป็นครั้งที่ 2 ส่งผลให้ขนาดของเกรน
มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น

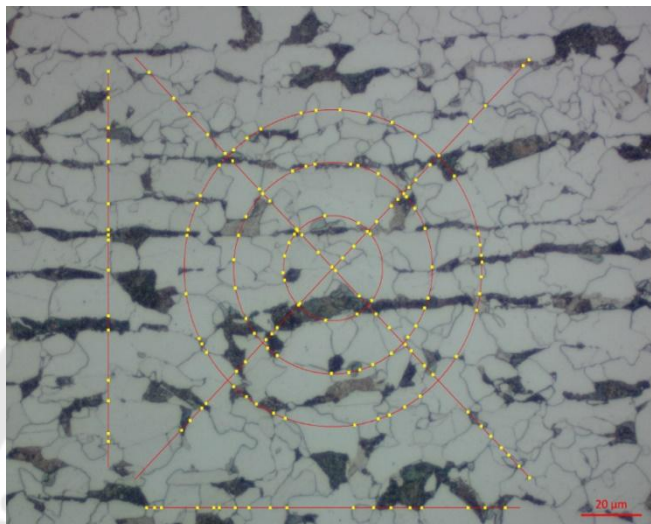


ภาพประกอบ 96 Intercept Method หาขนาดเกรนบริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์

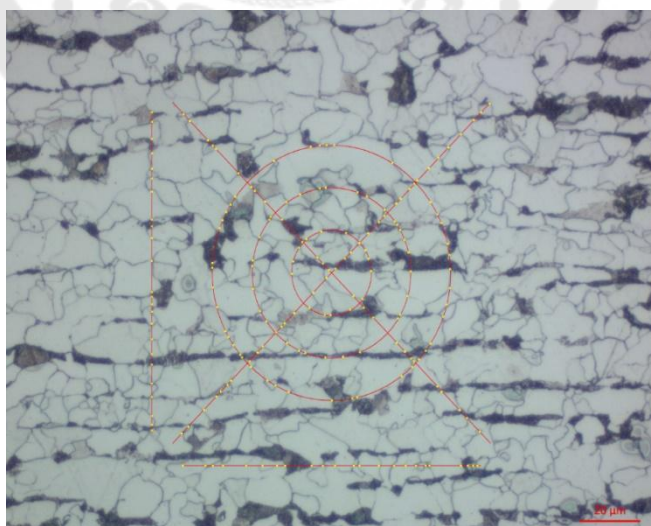
4.4.3 บริเวณโลหะฐาน (BM)

4.4.3.1 ลวดเชื่อม E7018

จากภาพประกอบ 97 และ 98 เป็นที่สังเกตได้ว่าขนาดเกรนบริเวณโลหะฐาน (BM) ของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A และ 110 A ซึ่งสามารถประเมินขนาดเกรนมีค่าเท่ากับ 12.1 และ 12.0 μm ตามลำดับ โดยขนาดเกรนของชิ้นงานทดสอบทั้งสองมีขนาดเกรนที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากในบริเวณโลหะฐาน (BM) จะไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมจึงทำให้ขนาดเกรนไม่มีการเปลี่ยนแปลง และใช้เป็นขนาดเกรนอ้างอิงของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม



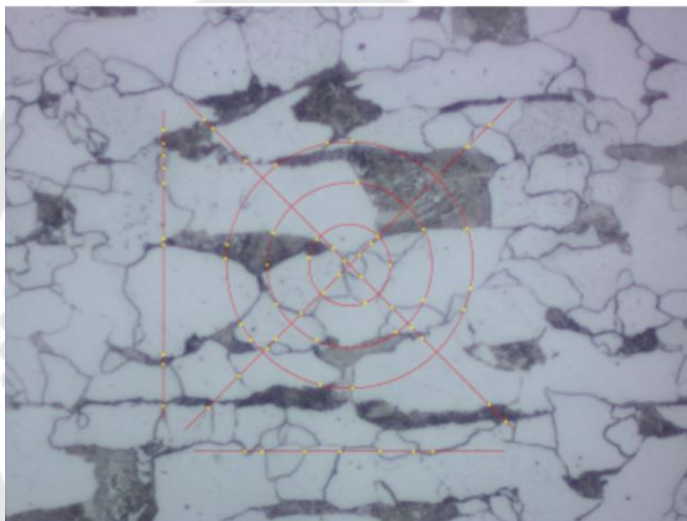
ภาพประกอบ 97 Intercept Method หาขนาดเกรนบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A กำลังขยาย 500x



ภาพประกอบ 98 Intercept Method หาขนาดเกรนบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A กำลังขยาย 500x

4.4.3.1 ลวดเชื่อม E8018

บริเวณโลหะฐานของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อม E7018 และ E8018 จะสามารถประเมินได้ว่าขนาดเกรนเท่ากับ $12.0 \mu\text{m}$ และ $10.8 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ซึ่งบริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบความร้อนจากกระบวนการเชื่อม ทำให้ปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดเกรนโดยตรงคือโครงสร้างพื้นฐานของโลหะฐาน ซึ่งเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่มีการผ่านความร้อนมาแล้วในกระบวนการผลิต ซึ่งเหล็กชนิดนี้มีการผลิตโดยการรีดร้อน ที่มีการเย็นตัวที่ช้าทำให้ขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่แต่เล็กกว่าที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน



ภาพประกอบ 99 Intercept Method หาขนาดเกรนบริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม SMAW ด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์

4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ฮอลล์-เพทช์

เพื่อให้ทราบความสัมพันธ์ของขนาดเกรนกับค่าความแข็งแรงดึงจุดคราก (Yield strength) สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ฮอลล์-เพทช์ (Hall-Petch) โดยทำการวิเคราะห์ที่บริเวณที่ขาดของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A และ 110 A ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ขนาดเกรนของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม ซึ่งสามารถประเมินขนาดเกรนมีค่าเท่ากับ $12 \mu\text{m}$ และค่าความแข็งแรงดึงจุดครากจากเครื่องทดสอบความแข็งแรงมีค่าเท่ากับ 519.64 N/mm^2 เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ฮอลล์-เพทช์ ค่าความแข็งแรงดึงจุดครากของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม มีค่าเท่ากับ 613.60 N/mm^2

จากการวิเคราะห์ขนาดเกรนของบริเวณที่เกิดการขาดของชิ้นงานทดสอบ คือ บริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A ซึ่งสามารถประเมินขนาดเกรนมีค่าเท่ากับ $10.8 \mu\text{m}$ และค่าความแข็งแรงดึงจุดครากจากเครื่องทดสอบความแข็งแรงมีค่าเท่ากับ 504.05 N/mm^2 เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ฮอลล์-เพทซ์ ค่าความแข็งแรงดึงจุดครากของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A มีค่าเท่ากับ 563.04 N/mm^2

จากการวิเคราะห์ขนาดเกรนของบริเวณที่เกิดการขาดของชิ้นงานทดสอบ คือ บริเวณแนวเชื่อม (FZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A ซึ่งสามารถประเมินขนาดเกรนมีค่าเท่ากับ $11.9 \mu\text{m}$ และค่าความแข็งแรงดึงจุดครากจากเครื่องทดสอบความแข็งแรงมีค่าเท่ากับ 502.27 N/mm^2 เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ฮอลล์-เพทซ์ ค่าความแข็งแรงดึงจุดครากของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A มีค่าเท่ากับ 602.89 N/mm^2



บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และเสนอแนะ

การศึกษาคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กไมโครอัลลอยด์ ASTM A572GR50 ที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมไฟฟ้า ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 และผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 โดยใช้กระแสไฟฟ้า 110 A เมื่อทำการทดสอบทั้งคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคแล้ว สามารถสรุปผลการทดสอบได้ ดังนี้

5.1 สรุปผลอภิปรายผล

5.1.1 การทดสอบค่าความแข็ง

5.1.1.1 ค่าความแข็งบริเวณโลหะฐาน (BM) ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม มีค่าความแข็งเฉลี่ย 220.2 HB ซึ่งชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 มีค่าความแข็งเฉลี่ย 223.2 HB และชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 มีค่าความแข็งเฉลี่ย 217.7 HB เมื่อโลหะได้รับความร้อนมากขึ้นจะทำให้โลหะมีความแข็งลดลง แต่ถ้าโลหะมีอัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดความแข็งในเนื้อโลหะเพิ่มมากขึ้น (12) จากผลการทดสอบพบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม E8018 นั้นมีค่าความแข็งน้อยกว่าชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม และผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 ซึ่งมีอัตราการคายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอบริเวณโลหะฐาน (BM)

5.1.1.2 บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) จะเห็นได้ว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมีค่าความแข็งสูงขึ้นเนื่องจากเป็นบริเวณที่ได้รับความร้อนจากการเชื่อมและมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วเพราะมีการระบายความร้อนให้กับอากาศโดยรอบและมีการระบายความร้อนให้กับบริเวณโลหะฐาน (BM) ทำให้โครงสร้างในบริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งทำให้บริเวณนี้มีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้บริเวณที่เกิดการแตกร้าวได้ง่ายขึ้น

5.1.1.3 บริเวณแนวเชื่อม (FZ) เมื่อคำนวณค่าเฉลี่ยในบริเวณนี้จะพบว่าค่าความแข็งที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 นั้นมีค่ามากกว่าผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 เนื่องจากลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 (0.10 %C) มีคาร์บอนสูงกว่า ลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 (0.06 %C) และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของบริเวณแนวเชื่อม (FZ) กับบริเวณอื่น ๆ จะพบว่าค่าความแข็งในบริเวณนี้ของลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 จะมีค่ามากที่สุดเพราะคุณสมบัติของลวดเชื่อมและอัตราการระบายความร้อนที่สูงกว่าบริเวณอื่น

ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของของ Syukran และคณะ (2022) ซึ่งรายงานไว้ว่า E7018 ให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่า E7016 และการเพิ่มกระแสไฟฟ้าจะลดค่าความแข็งแรงและงานวิจัยของ Díaz Ávila et และคณะ (21) พบว่าในเขต FZ จะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่า BM เนื่องจากโครงสร้าง acicular ferrite.

5.1.2 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 645.52 N/mm^2 มีตำแหน่งที่ขาดเยื้องจากจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน 10 mm ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 625.96 N/mm^2 มีตำแหน่งที่ขาดอยู่ในบริเวณแนวเชื่อม และชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 628.07 N/mm^2 มีตำแหน่งที่ขาดเยื้องจากจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน 14.1 mm ซึ่งอยู่ในบริเวณโลหะฐาน (BM) เนื่องจากบริเวณแนวเชื่อม (FZ) ของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อม E8018 นั้นมีโครงสร้างจุลภาคพื้นฐานเป็นเฟอร์ไรต์ และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) มีความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเนื่องจากความร้อนที่ได้รับ จึงส่งผลให้เกิดการขาดที่บริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนน้อยที่สุด

ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gangwar และ Kumar (2024) ที่ชี้ว่าการควบคุมกระแสไฟฟ้าและความเร็วเดินแนวเชื่อมมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงและคุณภาพรอยเชื่อมของ ASTM A572GR50. นอกจากนี้ Hamdey และคณะ (2024) รายงานว่า E7018 ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 518 MPa ซึ่งอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน

5.1.3 การทดสอบการกระแทก

ผลจากการทดสอบการกระแทกของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 และชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 จะสังเกตได้ว่าลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 จะมีค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกที่สูงที่สุดเนื่องจากลวดเชื่อมไฟฟ้าชนิดนี้ถูกทดสอบที่อุณหภูมิ $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และคุณสมบัติของลวดเชื่อมชนิดนี้มีความเหนียว จึงต้องใช้พลังงานที่มากในการกระแทกเพื่อให้ขาดออกจากกัน ส่วนลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 จะมีค่าการดูดซับพลังงานที่น้อยกว่าลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 เพราะลวดเชื่อมชนิดนี้มีการทดสอบที่อุณหภูมิ $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และลวดชนิดนี้มีความแข็งแรงและความเปราะภายในเหล็กจะมากขึ้นเมื่ออยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำ จึงใช้พลังงานที่สูงในการกระแทกเพื่อทำให้ขาดออกจากกันที่บริเวณแนวเชื่อมแต่ไม่

มากเท่าลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 สำหรับการทดสอบการกระแทกที่ไม่ผ่านการเชื่อมนี้ที่มีค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกที่ไม่สูง เนื่องจากมีคุณสมบัติตามโครงสร้างของเหล็กที่มีความเหนียวแต่น้อยกว่าในลวดเชื่อมทั้งสองชนิด จึงใช้พลังงานในการกระแทกไม่มากนักเพื่อให้ขาดออกจากกัน

งานวิจัยของ Gangwar และ Kumar (20) ซึ่งว่าการเชื่อมไฟฟ้า SMAW ด้วยลวดเชื่อม E7018 ให้ความเหนียวและความสามารถในการดูดซับพลังงานการกระแทกที่ดีในโครงสร้างเหล็ก ASTM A572GR50 งานวิจัยของ Díaz Ávila และคณะ (21) ก็พบว่า การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างใน HAZ ส่งผลต่อความเหนียวและความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก

5.1.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

5.1.4.1 บริเวณโลหะฐาน (BM) และบริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (HAZ) พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 และชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 ที่กระแสไฟฟ้า 110A จะมีองค์ประกอบหลักคือซิลิกอน แมงกานีส เหล็กและคาร์บอน ส่งผลให้เหล็กมีความแข็งและเหนียว

5.1.4.2 บริเวณแนวเชื่อม (FZ) พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 มีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกอน แมงกานีส เหล็กและคาร์บอน แต่จะมีปริมาณเหล็กน้อยกว่าที่บริเวณโลหะฐานและบริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน จึงส่งผลให้มีความแข็งแรงดิ่งที่น้อยกว่าบริเวณเนื้อเหล็กและทนต่อแรงกระแทก ส่วนชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 จะมีองค์ประกอบหลักทางเคมีเหมือนกับลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 แต่จะมีองค์ประกอบทางเคมีที่เพิ่มขึ้นมา คือ ทองแดงและโครเมียมจึงทำให้ลวดเชื่อมชนิดนี้ทนต่อการกัดกร่อนและมีค่าความแข็งแรงดิ่งที่สูง

ผลงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gangwar และ Kumar (20) ที่ระบุว่า การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีในแนวเชื่อมมีผลต่อคุณสมบัติทางกลและการต้านทานการกัดกร่อนของ ASTM A572GR50

5.1.5 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

5.1.5.1 บริเวณแนวเชื่อม (FZ) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 จะมีเฟอร์ไรต์เป็นโครงสร้างพื้นฐานซึ่งสอดคล้องกันกับลวดเชื่อมที่นำมาใช้ (ลวดเชื่อมคาร์บอนต่ำ 0.06 %C) ทำให้มีการรับแรงกระแทกได้ดีกว่าบริเวณอื่น แต่มีความแข็งน้อยกว่าบริเวณอื่น ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 จะมีเพิร์ลไลต์เป็นโครงสร้างพื้นฐานซึ่งจะส่งผลให้โลหะบริเวณนี้มีความแข็งมากกว่าบริเวณอื่น

5.1.5.2 บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 และชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 มีโครงสร้างต่างกัน เนื่องจากสภาพแวดล้อมในขณะที่เย็นตัวมีความแตกต่างกันจึงอาจทำให้อัตราการเย็นตัวไม่เท่ากัน ส่งผลให้ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 มีเฟอร์ไรต์เป็นโครงสร้างพื้นฐานแต่น้อยกว่าบริเวณแนวเชื่อม (FZ) และมีโครงสร้างเพิร์ลไลต์กระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณจึงส่งผลให้มีค่าความแข็งและค่าความแข็งแรงดิ่งที่มากกว่าบริเวณแนวเชื่อม ส่วนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 จะมีเพิร์ลไลต์เป็นโครงสร้างพื้นฐานและยังพบมาร์เทนไซต์ เฟอร์ไรต์กระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณจึงส่งผลให้มีค่าความแข็งน้อยกว่าบริเวณแนวเชื่อม

5.1.5.3 บริเวณโลหะฐาน (BM) จะเทียบบริเวณนี้เป็นชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเชื่อม จะมีเฟอร์ไรต์เป็นโครงสร้างพื้นฐานจึงทำให้มีความแข็งน้อยกว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อนและบริเวณแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018

จากงานวิจัยของ Diaz Ávila และคณะ (21) รายงานว่า FZ ของ ASTM A572GR50 ที่เชื่อมด้วย GMAW มี acicular ferrite เป็นโครงสร้างหลักในขณะที่ HAZ มี bainite, pearlite และ ferrite ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษานี้ เช่นเดียวกับ Gangwar และ Kumar (20) ก็ระบุว่าโครงสร้างจุลภาคที่ละเอียดช่วยเพิ่มความแข็งแรง

5.1.6 การวิเคราะห์ขนาดเกรน

5.1.6.1 บริเวณแนวเชื่อม (FZ) ขนาดเกรนของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 สามารถประเมินได้ว่ามีขนาดเกรนเท่ากับ $11.9 \mu\text{m}$ และลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 ไม่สามารถประเมินได้เนื่องจากมีขนาดเกรนที่เล็กเกินไป ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อม E7018 มีขนาดใหญ่กว่า E8018 เนื่องจากลวดเชื่อม E7018 มีคาร์บอนต่ำและมีโครงสร้างเฟอร์ไรต์เป็นโครงสร้างพื้นฐาน จึงทำให้มีความแข็งและค่าความแข็งแรงดิ่งน้อยกว่าลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018

5.1.6.2 บริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (HAZ) ขนาดเกรนของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 และ E8018 จะประเมินได้ว่ามีขนาดเกรนเท่ากับ $13.3 \mu\text{m}$ และ $13.5 \mu\text{m}$ ตามลำดับ โดยขนาดเกรนของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 มีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E8018 เนื่องจากบริเวณที่ทดสอบคือเหล็กชนิดเดียวกันและอาจมีอัตราการเย็นตัวที่ใกล้เคียงกันและมีขนาดเกรนที่ใหญ่กว่าบริเวณอื่นจึงส่งผลให้มีความเหนียวสูง

5.1.6.3 บริเวณโลหะฐาน (BM) ขนาดเกรนของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า E7018 และ E8018 จะประเมินได้ว่ามีขนาดเกรนเท่ากับ 12.0 μm และ 10.8 μm ตามลำดับ โดยขนาดเกรนของชิ้นงานนี้มีขนาดต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากบริเวณโลหะฐานจะเป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมทำให้ขนาดเกรนไม่มีการเปลี่ยนแปลงและใช้เป็นขนาดเกรนอ้างอิงของชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม

จากงานวิจัยของ Lehto และคณะ (22) เสนอว่าในโลหะเชื่อม ขนาดเกรนที่เล็กลงจะช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงดึงตามสมการ Hall-Petch. และงานวิจัยของ Díaz Ávila และคณะ ก็พบว่าความแตกต่างของขนาดเกรนใน HAZ มีผลต่อคุณสมบัติทางกลเช่นเดียวกัน

5.1.7 ความสัมพันธ์ฮอลล์-เพทช์

จากความสัมพันธ์ฮอลล์-เพทช์ (Hall-Patch) โดยความแข็งแรงดึงจุดครากเฉลี่ย (Yield strength) ที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรง (Tensile test) ของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A และ 110 A มีค่าเท่ากับ 519.64, 563.04 และ 602.89 N/mm^2 ตามลำดับ และความแข็งแรงดึงจุดครากที่ได้จากความสัมพันธ์ของฮอลล์-เพทช์ (Hall-Petch) ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A และ 110 A มีค่าเท่ากับ 613.60, 563.04 และ 602.89 N/mm^2 ตามลำดับ

ผลของความสัมพันธ์ของ ฮอลล์-เพทช์ จากงานวิจัยนี้ยืนยันโดย Wang และคณะ (23) ที่ศึกษาความแข็งแรงเพิ่มของฮอลล์-เพทช์ (Hall-Petch strengthening) ในเหล็กกล้า พบว่ายิ่งขนาดเกรนเล็กลง ค่าความแข็งแรงที่จุดครากจะสูงขึ้น ในขณะที่ Lehto และคณะ (2014) ยังเสนอสมการ ฮอลล์-เพทช์ ที่ปรับปรุงสำหรับโลหะเชื่อมที่มีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทำการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูลให้ได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำนั้นจะต้องมีความรู้ความชำนาญทางด้านโลหะวิทยา เครื่องมือวัดและเครื่องมือทดสอบต้องมีความแม่นยำสูง ขนาดของชิ้นงานทดสอบต้องตรงตามที่มาตรฐานกำหนด เพื่อผลการทดสอบที่แม่นยำควรเพิ่มตัวอย่างชิ้นงานทดสอบในแต่ละการทดสอบให้มากขึ้น

บรรณานุกรม

1. Chen X-w, Qiao G-y, Han X-l, Wang X, Xiao F-r, Liao B. Effects of Mo, Cr and Nb on microstructure and mechanical properties of heat affected zone for Nb-bearing X80 pipeline steels. *Materials & Design*. 2014;53:888-901.
2. Guo W, Crowther D, Francis JA, Thompson A, Liu Z, Li L. Microstructure and mechanical properties of laser welded S960 high strength steel. *Materials & Design*. 2015;85:534-48.
3. Haugen VG, Rogne BRS, Akselsen OM, Thaulow C, Østby E. Local mechanical properties of intercritically reheated coarse grained heat affected zone in low alloy steel. *Materials & Design*. 2014;59:135-40.
4. Hu J, Du L-X, Wang J-J, Xie H, Gao C-R, Misra R. High toughness in the intercritically reheated coarse-grained (ICRCG) heat-affected zone (HAZ) of low carbon microalloyed steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2014;590:323-8.
5. Sharma SK, Maheshwari S. A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2017;38:203-17.
6. Hutchinson B, Komenda J, Rohrer GS, Beladi H. Heat affected zone microstructures and their influence on toughness in two microalloyed HSLA steels. *Acta Materialia*. 2015;97:380-91.
7. Kumar S, Nath S. Effect of heat input on impact toughness in transition temperature region of weld CGHAZ of a HY 85 steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016;236:216-24.
8. Lan L, Qiu C, Zhao D, Gao X, Du L. Microstructural characteristics and toughness of the simulated coarse grained heat affected zone of high strength low carbon bainitic steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;529:192-200.
9. Lan L, Kong X, Qiu C, Zhao D. Influence of microstructural aspects on impact toughness of multi-pass submerged arc welded HSLA steel joints. *Materials & Design*. 2016;90:488-98.
10. Lee SG, Lee DH, Sohn SS, Kim WG, Um K-K, Kim K-S, et al. Effects of Ni and Mn

addition on critical crack tip opening displacement (CTOD) of weld-simulated heat-affected zones of three high-strength low-alloy (HSLA) steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2017;697:55-65.

11. Zhang Y, Zhang H, Liu W, Hou H. Effects of Nb on microstructure and continuous cooling transformation of coarse grain heat-affected zone in 610 MPa class high-strength low-alloy structural steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2009;499(1-2):182-6.

12. Nathan SR, Balasubramanian V, Malarvizhi S, Rao A. Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints. *Defence Technology*. 2015;11(3):308-17.

13. ณัฐพล ทองทวิง สท, อนุพงศ์ สิงหราชชัย. การศึกษาอัตราการเติมเนื้อเชื่อมและประสิทธิภาพในการเติมเนื้อโลหะของลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์ AWS A5.1 เกรด E6013 และ E6019 สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ASTM A283. กรุงเทพฯ: (ปริญญาานิพนธ์ปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการเชื่อม); 2561.

14. เต็งหงส์เจริญ ส. วิศวกรรมกรรมการเชื่อม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ; 2531.

15. ลิ้มนา ส. การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงล้าของผิวเชื่อมพอกของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์. สงขลา: (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ); 2553.

16. ทิทัมพร เชื้อผู้ดี ปต, โยธิน หอมจุ. สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมเหล็กหล่อสีเทา ASTM A-48. กรุงเทพฯ: วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล; 2559.

17. Mohammed D. Hamdey AHK, Bashar Mahmood Ali, Muhammad Asmail Eleiwi,, Hasan Shakir Majdi MMA. Comparative Analysis of Electrode Performance and Thermal Treatments in SMAW of Dissimilar Metal Joints. *International Journal of Heat and Technology*. 2024;42(6):2173-84.

18. Pamnani R, Jayakumar T, Vasudevan M, Sakthivel T. Investigations on the impact toughness of HSLA steel arc welded joints. *Journal of Manufacturing Processes*. 2016;21:75-86.

19. Saha D, Westerbaan D, Nayak S, Biro E, Gerlich A, Zhou Y. Microstructure-

properties correlation in fiber laser welding of dual-phase and HSLA steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2014;607:445-53.

20. Gangwar P, Kumar D. REVIEW OF WELDABILITY OF GRADE 50 ASTM A572, GRADE A36 ASTM, AND GRADE40C8 ASTM USING SHIELDED METAL ARC WELDING. *Journal of Emerging Technology and Innovative Research*. 2024;11(1):675-89.

21. Ávila AMD, Oro EdJHD, Pérez ECM, Núñez EEN, Unfried J. Evaluation of the Effect of Heat Input on Welded Joint Properties of ASTM A572 Grade 50 Steel Using the GMAW Process with 90Ar-10CO₂ Shielding Gas and Spray Metal Transfer. *Soldagem & Inspeção*. 2023;28:2173-84.

22. Lehto P, Remes H, Saukkonen T, Hänninen H, Romanoff J. Influence of grain size distribution on the Hall-Petch relationship of welded structural steel *Materials Science and Engineering: A*. 2014;592:28-39.

23. Wang YH, Kang JM, Peng Y, Wang TS, Hansen N, e XHd. Hall-Petch strengthening in Fe-34.5Mn-0.04C steel cold-rolled, partially recrystallized and fully recrystallized. *Scripta Materialia*. 2018;155:41-5.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

1. ค่าความร้อนป้อนเข้า (Heat Input) ในการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A

แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม 30 V

กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม 90 A

อัตราเร็วในการเชื่อม 100 mm/min

ประสิทธิภาพทางความร้อน 65 % (การศึกษาค้นคว้าการเติมเนื้อเชื่อมและประสิทธิภาพในการเติมเนื้อโลหะของลวดเชื่อมไฟฟ้า. 2561: 24)

$$\text{จากสมการ 2.1} \quad \text{Heat Input} = \frac{60VA}{1000v} (\text{Heat Efficiency})$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} &= \frac{(60)(30)(90)}{1000(100)} (0.65) \\ &= 1.053 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่า Heat Input ที่ให้ในการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A เท่ากับ 1.053 kJ/mm

2. ค่าความร้อนป้อนเข้า (Heat Input) ในการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A

แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม 30 V

กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม 110 A

อัตราเร็วในการเชื่อม 100 mm/min

ประสิทธิภาพทางความร้อน 65 % (การศึกษาค้นคว้าการเติมเนื้อเชื่อมและประสิทธิภาพในการเติมเนื้อโลหะของลวดเชื่อมไฟฟ้า. 2561: 24)

$$\text{จากสมการ 2.1} \quad \text{Heat Input} = \frac{60VA}{1000v} (\text{Heat Efficiency})$$

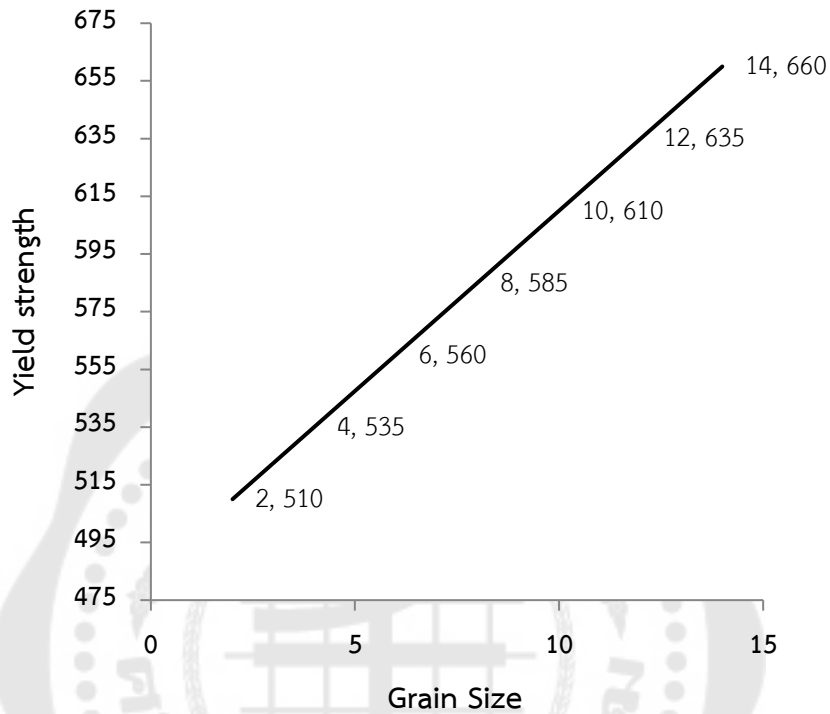
$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} &= \frac{(60)(30)(110)}{1000(10)} (0.65) \\ &= 1.287 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่า Heat Input ที่ให้ในการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A เท่ากับ 1.287 kJ/mm



ภาคผนวก ข

1. ความสัมพันธ์ฮอลล์-เพทซ์ของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม



จากสมการ 2.21

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}}$$

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{635 - 510}{12 - 2} = 12.5 \text{ N/mm}^2$$

$$635 = \sigma_0 + 12.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_0 = 635 - 25 = 610 \text{ N/mm}^2$$

แทนค่า

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_y = 610 + 12.5(12)^{-\frac{1}{2}}$$

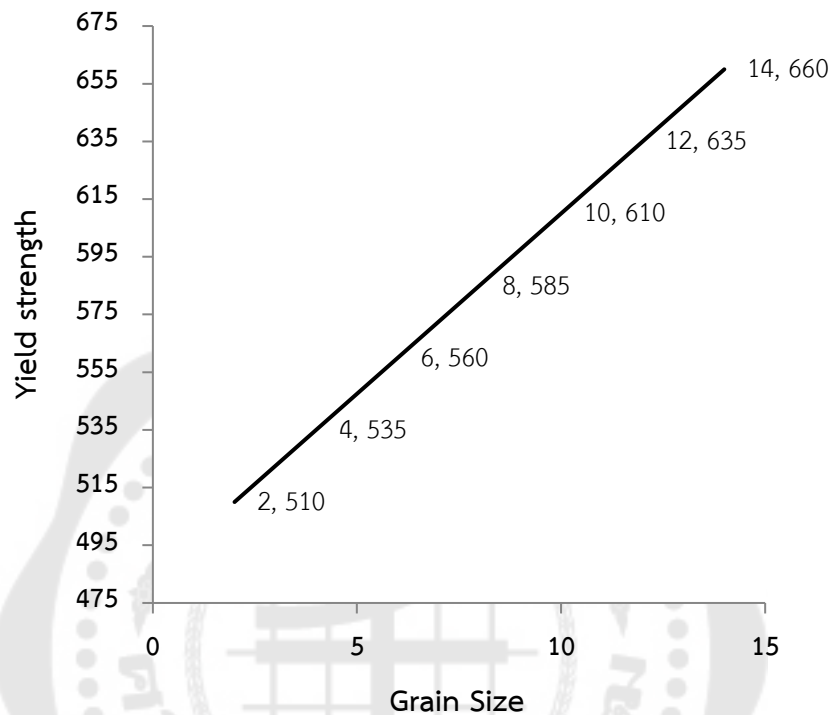
$$\sigma_y = 613.60 \text{ N/mm}^2$$

ดังนั้น จากความสัมพันธ์ฮอลล์-เพทซ์ ค่าความแข็งแรงดึงจุดคราก เท่ากับ 613.60 N/

mm²

2. ความสัมพันธ์ฮอลล์-เพทซ์ของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแส

ไฟฟ้า 90 A



จากสมการ 2.21

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}}$$

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{580 - 500}{10^{-2}} = 10 \text{ N/mm}^2$$

$$580 = \sigma_0 + 10 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_0 = 580 - 20 = 560 \text{ N/mm}^2$$

แทนค่า

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_y = 560 + 10(10.8)^{-\frac{1}{2}}$$

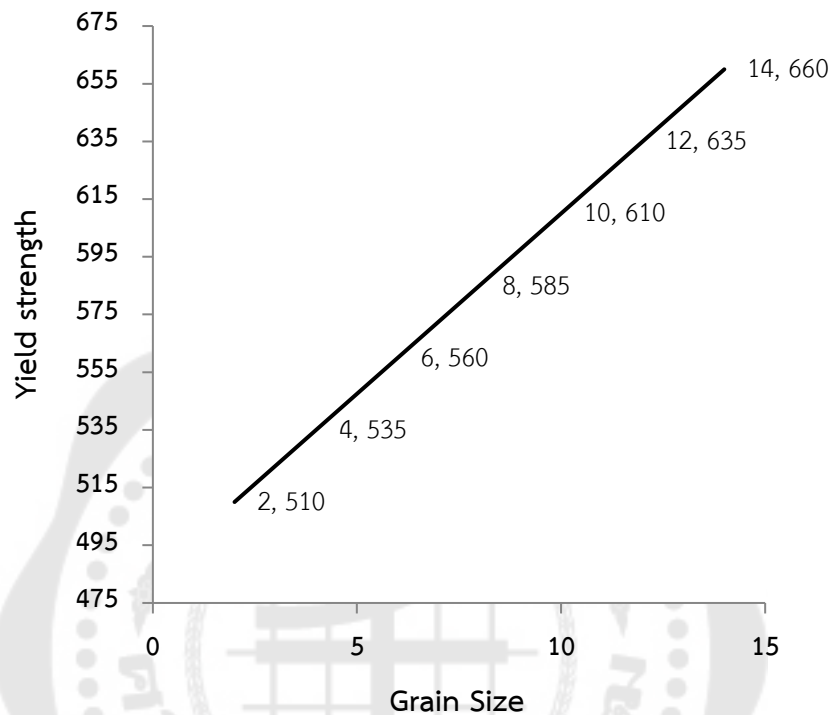
$$\sigma_y = 563.04 \text{ N/mm}^2$$

ดังนั้น จากความสัมพันธ์ฮอลล์-เพทซ์ ค่าความแข็งแรงดึงจุดคราก เท่ากับ 563.04

N/mm²

3. ความสัมพันธ์ฮอลล์-เพทซ์ของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแส

ไฟฟ้า 110 A



จากสมการ 2.21

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}}$$

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{620 - 500}{10^{-2}} = 10 \text{ N/mm}^2$$

$$620 = \sigma_0 + 10 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_0 = 620 - 20 = 600 \text{ N/mm}^2$$

แทนค่า

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_y = 600 + 10(11.9)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_y = 602.89 \text{ N/mm}^2$$

ดังนั้น จากความสัมพันธ์ฮอลล์-เพทซ์ ค่าความแข็งแรงดึงจุดคราก เท่ากับ 602.89 N/

mm²



ภาคผนวก ค

ตาราง ค.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม (ชิ้นงานทดสอบที่ 1)

ค่าความแข็งแรง (HB)	ตำแหน่ง				
	1	2	3	4	5
แถวที่ 1	198.4	201.5	210.1	186.5	210.1
แถวที่ 2	228.5	230.0	226.5	227.0	223.0
แถวที่ 3	227.0	225.5	230.0	230.0	225.5
เฉลี่ย	217.9	222.0	222.2	214.5	219.5

ตาราง ค.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม (ชิ้นงานทดสอบที่ 2)

ค่าความแข็งแรง (HB)	ตำแหน่ง				
	1	2	3	4	5
แถวที่ 1	200.8	208.7	213.7	182.0	214.0
แถวที่ 2	225.5	231.0	227.5	229.0	224.0
แถวที่ 3	222.0	228.5	227.5	227.5	222.0
เฉลี่ย	216.1	222.7	222.9	212.8	220.0

ตาราง ค.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม (ชิ้นงานทดสอบที่ 3)

ค่าความแข็งแรง (HB)	ตำแหน่ง				
	1	2	3	4	5
แถวที่ 1	209.2	206.9	222.0	215.0	207.8
แถวที่ 2	227.5	229.0	227.0	227.5	230.0
แถวที่ 3	225.5	227.5	230.0	227.0	224.0
เฉลี่ย	220.7	221.1	226.3	223.1	220.6

ตาราง ค.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อม

ค่าความแข็งแรง (HB)	ตำแหน่ง				
	1	2	3	4	5
ชิ้นงานทดสอบ 1	217.9	222.0	222.2	214.5	214.0
ชิ้นงานทดสอบ 2	216.1	222.7	222.9	212.8	220.0
ชิ้นงานทดสอบ 3	220.7	221.1	226.3	223.1	220.6
เฉลี่ย	218.3	221.9	223.8	216.8	218.2

ตาราง ค.5 ผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า
90 A (ชิ้นงานทดสอบที่ 1)

ค่าความแข็ง (HB)	ตำแหน่ง				
	1	2	3	4	5
แถวที่ 1	224.7	219.6	201.6	227.5	216.8
แถวที่ 2	225.5	229.0	211.9	247.2	225.0
แถวที่ 3	225.5	219.5	214.1	232.5	221.5
เฉลี่ย	218.6	222.7	210.7	235.7	221.1

ตาราง ค.6 ผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า
90 A (ชิ้นงานทดสอบที่ 2)

ค่าความแข็ง (HB)	ตำแหน่ง				
	1	2	3	4	5
แถวที่ 1	209.6	221.5	206.0	227.5	204.7
แถวที่ 2	232.5	225.5	206.0	234.5	227.0
แถวที่ 3	220.0	227.0	207.8	232.5	216.8
เฉลี่ย	220.7	224.7	206.6	231.5	216.2

ตาราง ค.7 ผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A(ชิ้นงานทดสอบที่ 3)

ค่าความแข็งแรง (HB)	ตำแหน่ง				
	1	2	3	4	5
แถวที่ 1	206.6	218.6	199.4	226.5	214.8
แถวที่ 2	229.6	227.2	209.2	245.6	224.7
แถวที่ 3	224.1	220.2	210.8	232.1	219.8
เฉลี่ย	220.1	222.0	206.5	234.7	219.8

ตาราง ค.8 ผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 A

ค่าความแข็งแรง (HB)	ตำแหน่ง				
	1	2	3	4	5
ชิ้นงานทดสอบ 1	218.6	222.7	210.7	235.7	221.1
ชิ้นงานทดสอบ 2	220.7	224.7	206.6	231.5	216.2
ชิ้นงานทดสอบ 3	220.1	222.0	206.5	234.7	219.8
เฉลี่ย	219.8	223.1	207.9	234.0	219.0

ตาราง ค.9 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A (ชิ้นงานทดสอบที่ 1)

ค่าความแข็ง (HB)	ตำแหน่ง				
	1	2	3	4	5
แถวที่ 1	209.6	210.5	196.4	230.5	214.1
แถวที่ 2	227.0	223.0	204.7	227.0	230.5
แถวที่ 3	225.0	220.0	199.6	216.4	223.5
เฉลี่ย	220.5	217.8	200.2	224.6	222.7

ตาราง ค.10 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 A (ชิ้นงานทดสอบที่ 2)

ค่าความแข็ง (HB)	ตำแหน่ง				
	1	2	3	4	5
แถวที่ 1	210.1	228.5	199.8	234.5	222.0
แถวที่ 2	228.5	222.0	205.6	220.5	228.5
แถวที่ 3	226.5	229.0	207.4	220.0	224.0
เฉลี่ย	221.7	226.5	204.3	225.0	224.8

ตารางท ค.11 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วย
กระแสไฟฟ้า 110 A (ชิ้นงานทดสอบที่ 3)

ค่าความแข็ง (HB)	ตำแหน่ง				
	1	2	3	4	5
แถวที่ 1	211.0	220.3	200.2	232.6	218.9
แถวที่ 2	226.3	221.6	208.0	225.0	226.5
แถวที่ 3	227.0	226.1	200.5	218.0	224.2
เฉลี่ย	221.4	222.7	202.9	225.2	223.2

ตารางที่ ค.12 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วย
กระแสไฟฟ้า 110 A

ค่าความแข็ง (HB)	ตำแหน่ง				
	1	2	3	4	5
ชิ้นงานทดสอบ 1	220.5	217.8	200.2	224.6	222.7
ชิ้นงานทดสอบ 2	221.7	226.5	204.3	225.0	224.8
ชิ้นงานทดสอบ 3	221.4	222.7	202.9	225.2	223.2
เฉลี่ย	221.2	222.3	202.5	224.9	225.2



ภาคผนวก ง

GEMINI		ลวดเชื่อมสำหรับเหล็กคาร์บอนปานกลางและคาร์บอนต่ำ				
GEMINI 7018LT		AWS/SFA5.1 E 7018				
<p>ลวดเชื่อมเจมินี่ 7018LT เป็นลวดเชื่อมเบสิกชนิดไฮโดรเจนต่ำ ออกแบบพิเศษสำหรับงานเชื่อมเหล็กกล้า เหล็กกล้าอะมุน เหล็กกล้าทนแรงดึงปานกลาง แนวเชื่อมสามารถทนแรงกระแทกได้สูงในสภาวะอุณหภูมิต่ำถึง -20 °C เหมาะกับ งานโครงสร้างสะพาน งานโครงสร้างตึก และงานเชื่อมถังบรรจุผลิตภัณฑ์แรงดันสูง โดยจะเพิ่มเนื้อเชื่อมมากกว่าปกติ</p>						
คุณสมบัติของแนวเชื่อม						
ส่วนผสมทางเคมี (%)		คุณสมบัติทางกล				
C	0.06	Yield stress	460	N/mm ²		
Mn	1.08	Tensile strength	570	N/mm ²		
Si	0.52	Elongation	27	%		
		CVN Impact Energy	80	Joule @-20°C		
กระแสไฟฟ้าที่ใช้เชื่อม						
AC หรือ DC ±						
Ø/ความยาว (มม.)	2.6X300	3.2X350	4.0X400	5.0X400		
กระแสไฟต่ำสุด/สูงสุด (A)	60-90	90-130	110-180	160-230		
รับรองโดย		สีมดัม	ปลายลวด	ฟ้า		
ABS LR มอก. 49-2528			ข้างลวด	เทา		
		ชื่อพิมพ์	G-7018LT/E 7018			
		ตำแหน่ง	ทำราบ, ทำขนานนอน			
		ทำเชื่อม	ทำเชื่อมขึ้นและทำเชื่อมเหนือศีรษะ			

ภาพประกอบ ง.1 คุณสมบัติของลวดเชื่อม GEMINI 7018LT (AWS A5.1 E 7018)

YAWATA 8018-B2

สำหรับเหล็กทนความร้อน
โครเมียม 1.25% - โมลิบดีนัม 0.5%

การจำแนกประเภท

AWS A 5.5 : E8018-B2
DIN 8575 : E CrMo 1 B 20
ISO 3580 : E 1 CrMo B 20

การใช้งาน

ใช้เชื่อมเหล็กที่ทนต่อแรงเค้นประเภทโครเมียม-โมลิบดีนัม เช่นเหล็กเกรด BS 1501-620, 621 เทียบเท่ากับเหล็กหล่อและเหล็กตีขึ้นรูป

คุณสมบัติ

ยาวาต้า 8018-B2 เป็นลวดเชื่อมควบคุมไฮโดรเจน ชนิดพอกหุ้มต่าง สำหรับเชื่อมเหล็กอัลลอยต่ำที่ทนต่อแรงเค้น ประเภทโครเมียม-โมลิบดีนัม ใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ถึง 550°C เหมาะสำหรับการเชื่อมเหล็กก่ออิฐน้ำชนิดหนา และซ่อมงานเหล็กเหนียวหล่อ มีสะเก็ดไฟน้อย สแลกหลุดออกได้ง่าย

ส่วนผสมทางเคมีในเนื้อโลหะเชื่อม (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.10	0.40	0.80	≤0.020	≤0.020	1.20	0.50

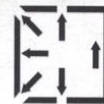
คุณสมบัติทางกลของเนื้อโลหะเชื่อม

ความต้านแรงดึง N/mm ²	ความเค้นคราก N/mm ²	อัตราการยืดตัว %	ทนแรงกระแทก 2V-notch ที่ 0°C J
700	550	20	40

ขนาดและช่วงกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC หรือ DC +)

ขนาด/ความยาว (มม.)	2.6/300	3.2/350	4.0/400	5.0/450
ทำเชื่อม	กระแสไฟ (A)			
F	60~90	90~130	140~180	190~230
V, OH	60~90	80~110	110~150	130~170

ท่าเชื่อม



ทุกท่าเชื่อม
ยกเว้นท่าเชื่อมลงแนวตั้ง

ข้อแนะนำในการใช้งาน

- ใช้ลวดเชื่อมที่แห้ง ควรนำลวดเชื่อมที่ขึ้นโปบที่อุณหภูมิ 300~350°C เป็นเวลา 60 นาทีก่อนใช้
- ควรควบคุมระยะอาร์กให้สั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้
- อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 200~250°C ก่อนเชื่อม และอบคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 620°C

ภาพประกอบ ง.2 คุณสมบัติของลวดเชื่อม YAWATA 8018-B2 (AWS A5.5 E8018)



ภาคผนวก จ

Specifications (Subject to change without notice.)



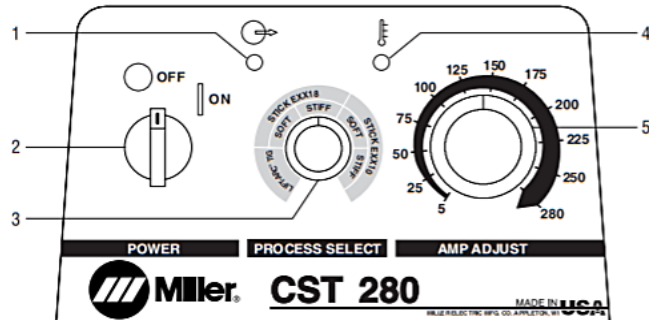
Description	Welding Mode	Input Power	Rated Output	Welding Amperage Range	Max. Open-Circuit Voltage	Amps Input at Rated Load Output, 50/60 Hz								KVA	KW	Dimensions	Net Weight
						208 V	220 V	230 V	400 V	440 V	460 V	575 V					
CST 280, 220-230V 460-575 V Dinse	Stick (SMAW)	Three-Phase	280 A at 31.2 V, 35% Duty Cycle	5-280 A	77 VDC	—	35	34.2	—	—	17.8	14.7	14.6	10.2	H: 13-1/2 in (343 mm) W: 7-1/2 in (191 mm) D: 18 in (457 mm)	41 lb (18.6 kg)	
			200 A at 28 V, 100% Duty Cycle			—	23.3	22.5	—	—	11.7	9.7	9.6	6.4			
	TIG (GTAW)	Single-Phase	200 A at 28 V, 50% Duty Cycle*	—		43.9	43	—	—	—	—	10.1	6.6				
		150 A at 26 V, 100% Duty Cycle*	—	32.7		32	—	—	—	—	—	7.3	4.6				
CST 280, 208-230V 400-460 V Dinse	Stick (SMAW)	Three-Phase	280 A at 31.2 V, 35% Duty Cycle	5-280 A	67 VDC	36	33	22.8	19.8	18	17.5	—	14	10.2	H: 13-1/2 in (343 mm) W: 7-1/2 in (191 mm) D: 18 in (457 mm)	41 lb (18.6 kg)	
			200 A at 28 V, 100% Duty Cycle			23.5	23	22.8	13.5	12	12.7	—	10.2	6.9			
	TIG (GTAW)	Single-Phase	200 A at 28 V, 50% Duty Cycle*	43.9		43.3	43	—	—	—	—	9.9	6.5				
		150 A at 26 V, 100% Duty Cycle*	35	33.9		32.9	—	—	—	—	—	7.6	4.8				

* Output ratings on 230 V single-phase are reduced to comply with CSA current limitation on input power cable.

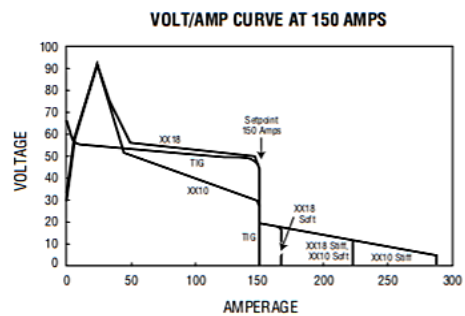
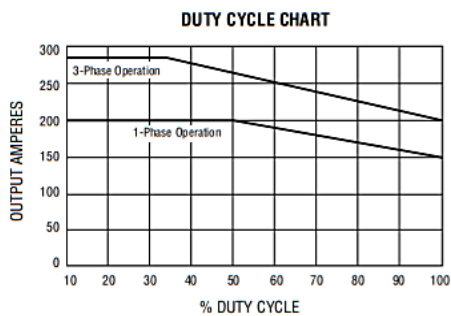
CSA approval. 1P23M approval.

Control Panel

1. Output Light
2. On/Off Switch
3. Weld Process Selector Switch
4. Overtemp Light
5. Amperage Adjustment Control (5-280 Amps)



Performance Data

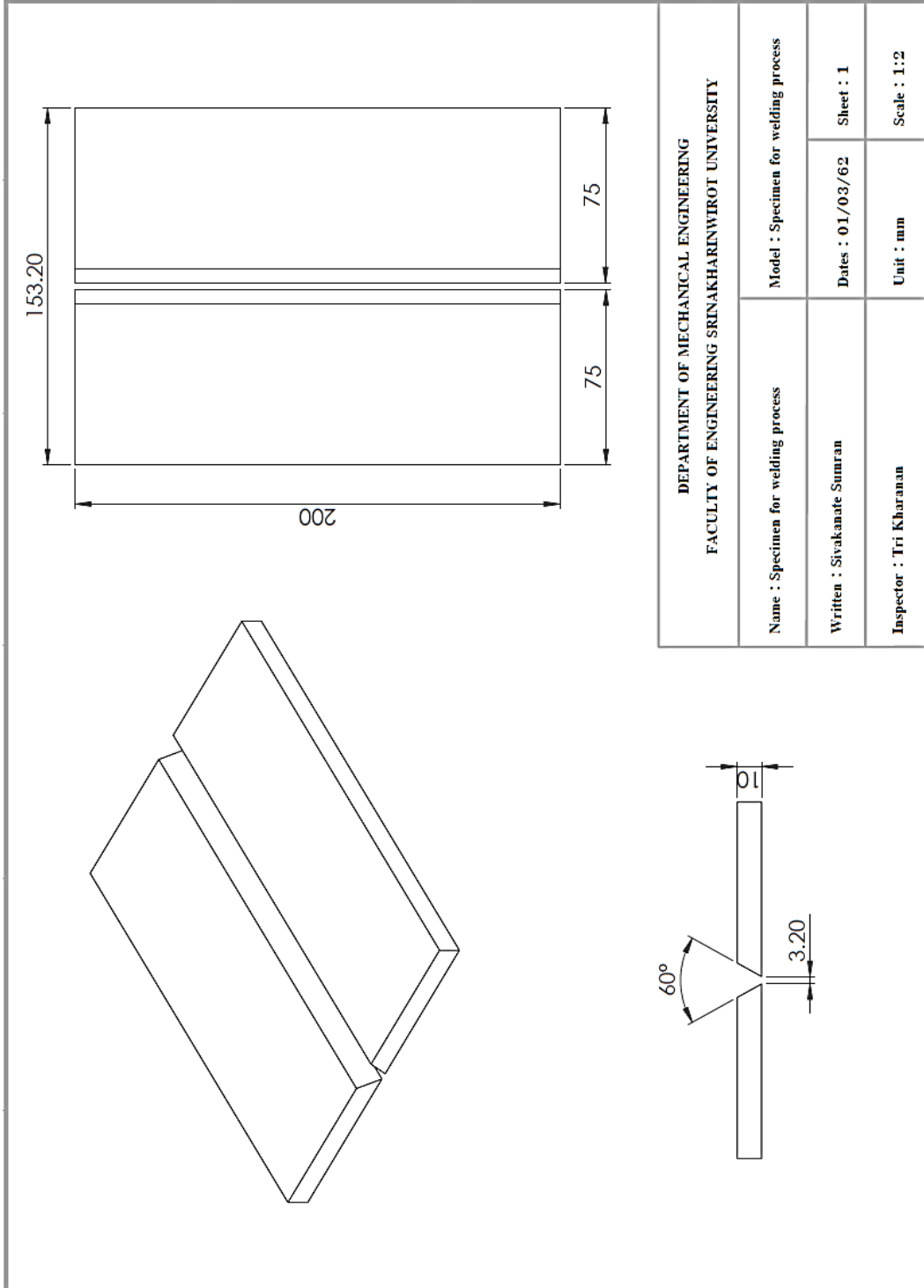


ภาพประกอบ จ.1 เครื่องเชื่อม SMAW ยี่ห้อ Miller รุ่น CST 280



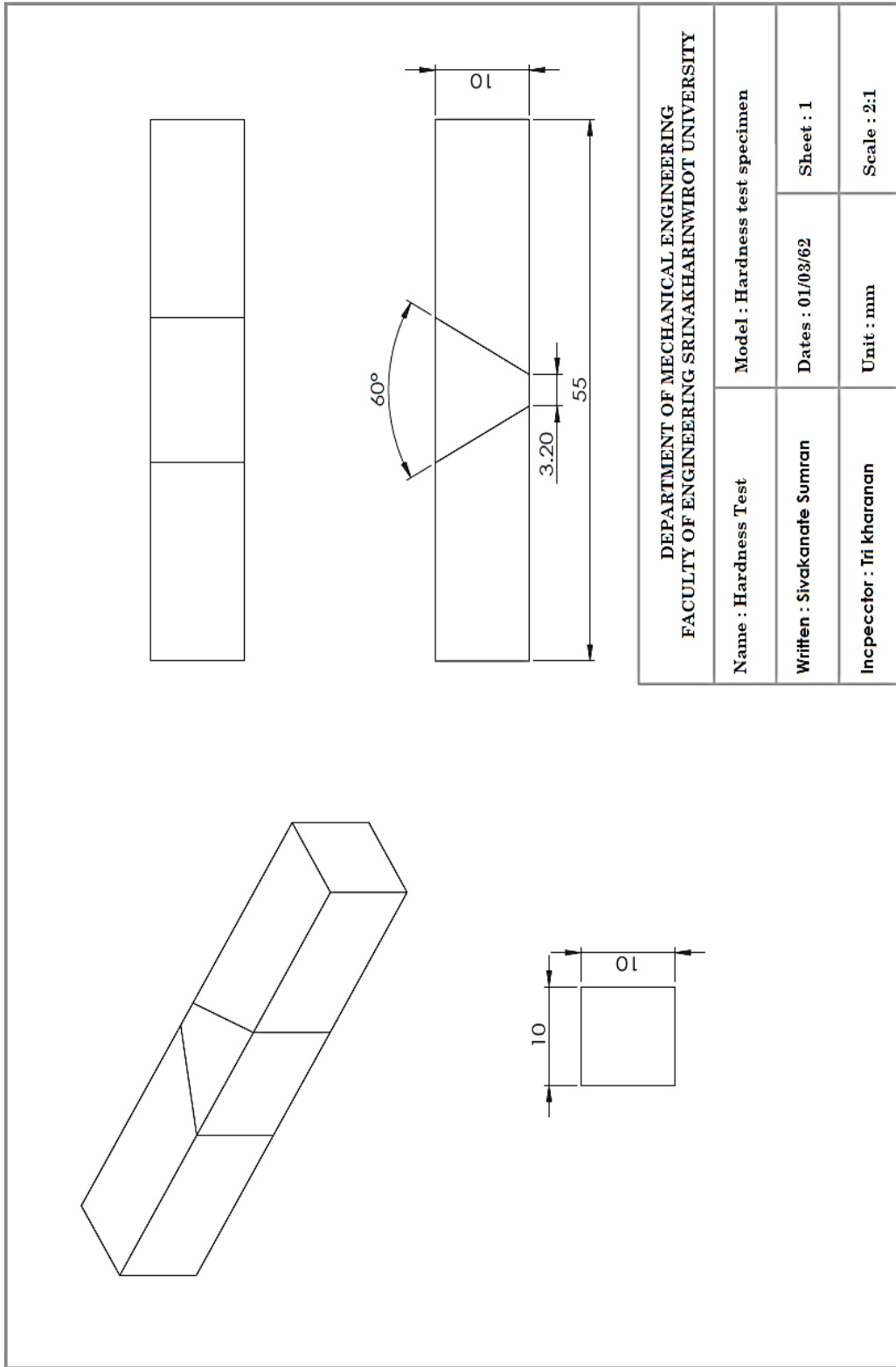
ภาคผนวก จ

ภาคผนวก ฉ

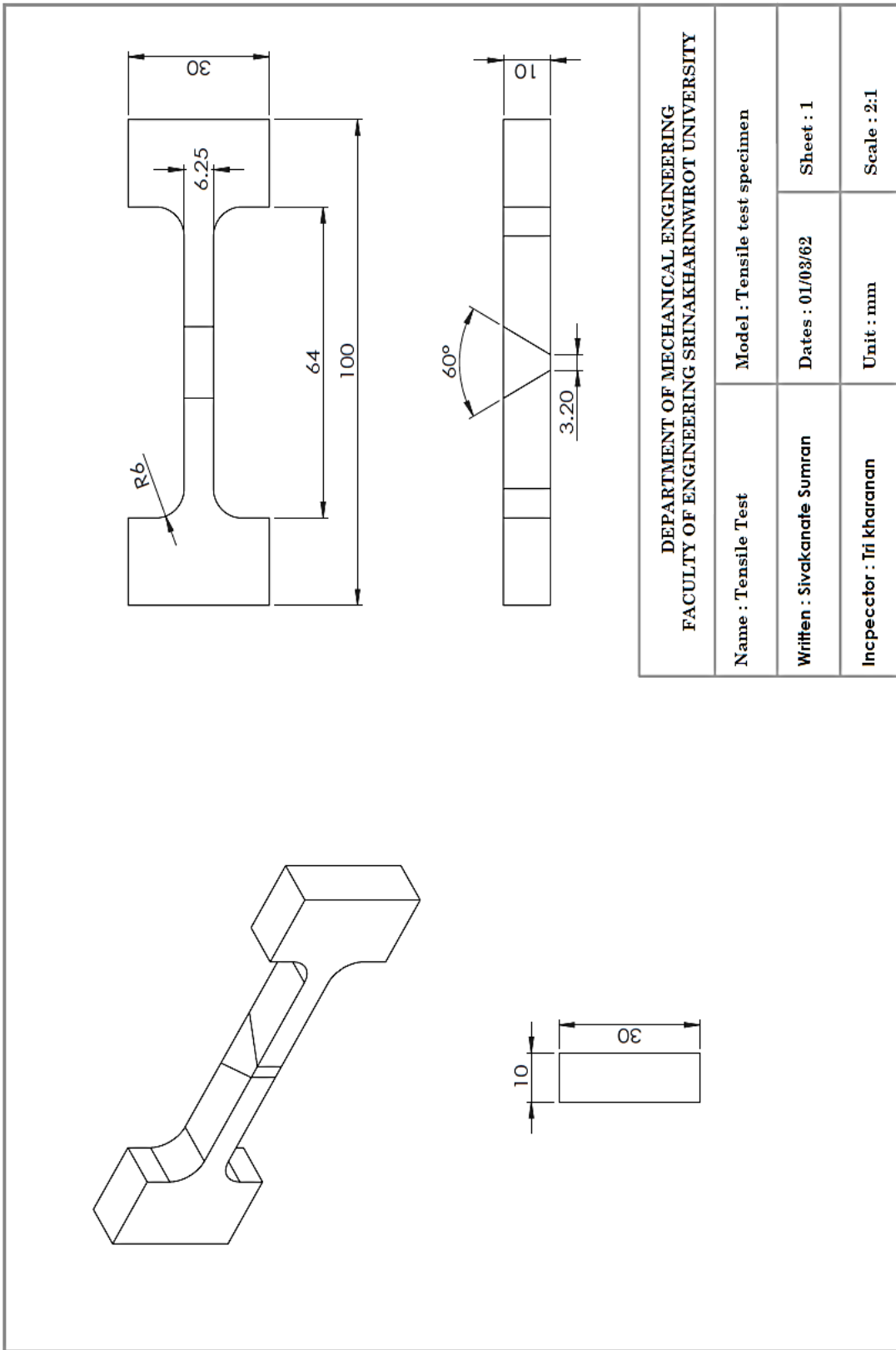


ภาพประกอบ ฉ.1 แบบชิ้นงานสำหรับกระบวนการเชื่อม

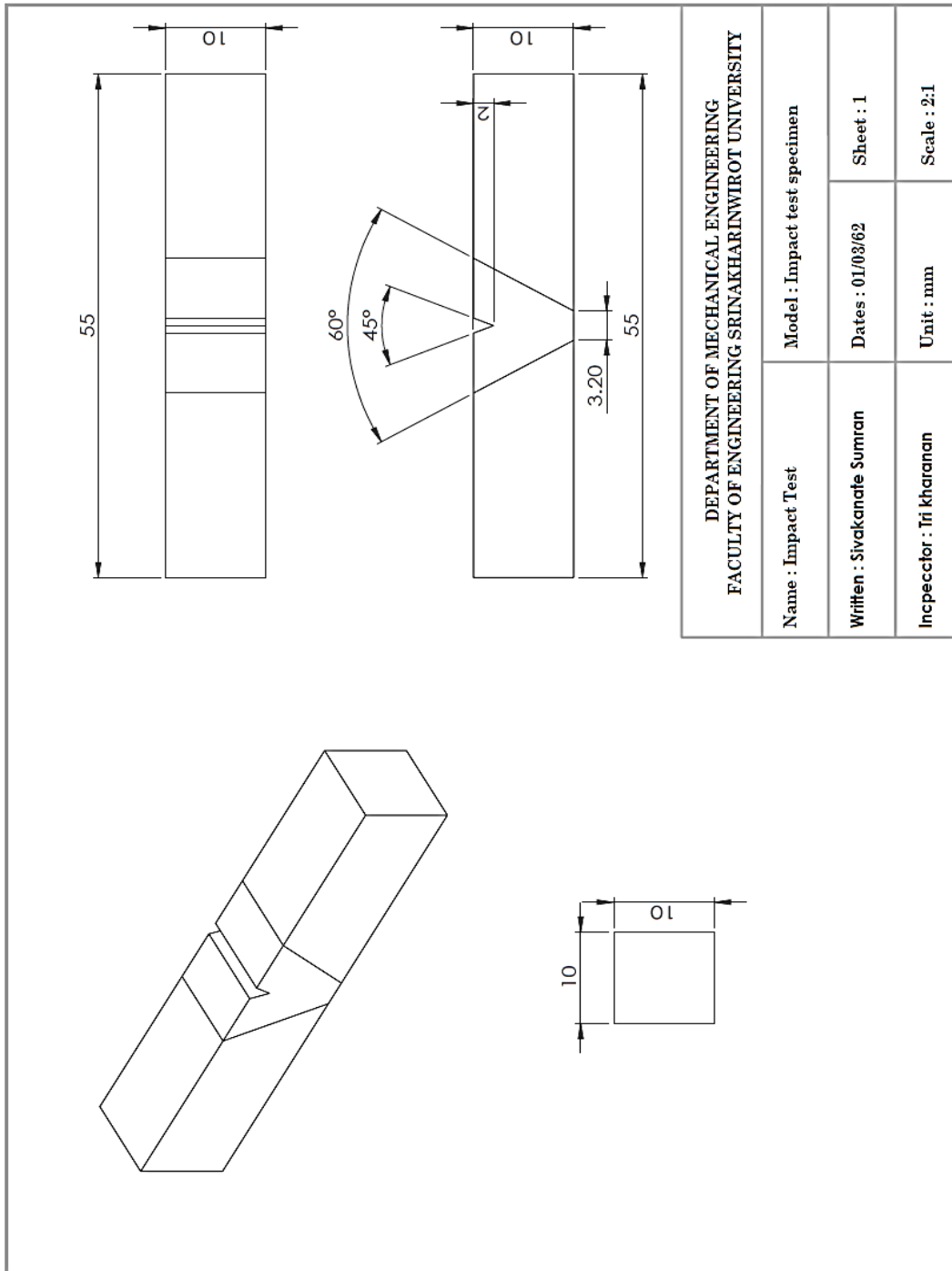
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING SRINAKHARINWIROT UNIVERSITY			
Name : Specimen for welding process	Model : Specimen for welding process		
Written : Sivakanate Sunran	Dates : 01/03/62	Sheet : 1	
Inspector : Tri Kharanan	Unit : mm	Scale : 1:2	



ภาพประกอบ น.2 แบบชิ้นงานทดสอบในการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ มาตรฐาน ASTM E



ภาพประกอบ ฉ.3 แบบชิ้นงานทดสอบในการทดสอบความแข็งแรง มาตรฐาน ASTM E 8M



ภาพประกอบ ฉ.4 แบบชิ้นงานทดสอบในการทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี
 มาตรฐาน ASTM E 23

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ไตร คะระนันท์
วัน เดือน ปี เกิด	27 สิงหาคม 2518
ผลงานตีพิมพ์	-
รางวัลที่ได้รับ	-

