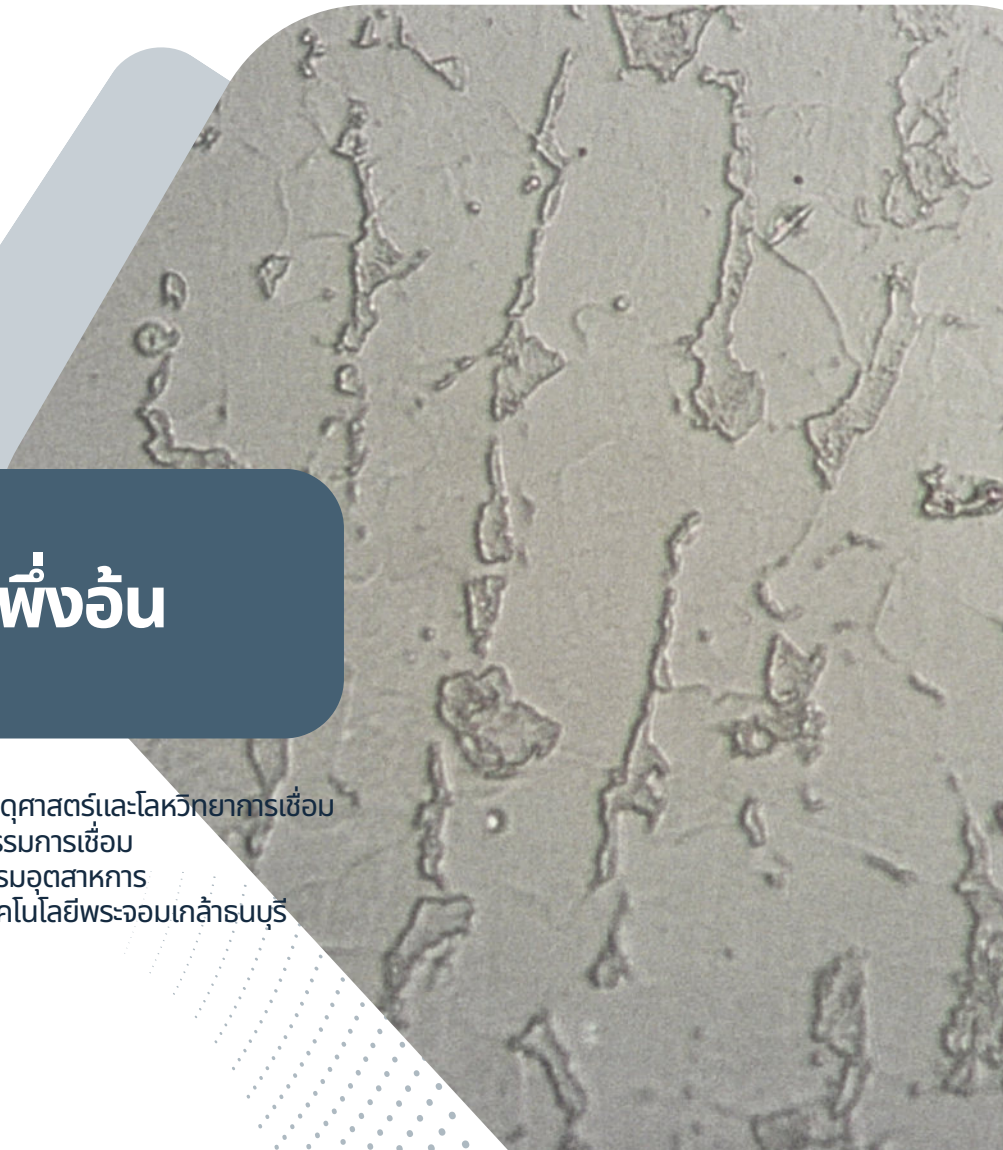




โลหวิทยาการเชื่อมสำหรับวิศวกร: เหล็กกล้าคาร์บอน

WELDING METALLURGY FOR ENGINEERS:
CARBON STEEL



อีศรทต ฟั่งอั้น

กลุ่มวิชาด้านวัสดุศาสตร์และโลหวิทยาการเชื่อม
สาขาวิชาวิศวกรรมการเชื่อม
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

โลหวิทยาการเชื่อมสำหรับวิศวกร: เหล็กกล้าคาร์บอน

Welding Metallurgy for Engineers: Carbon Steel

อิสรทัต พึ่งอัน

2567

360. -

โลหะวิทยาการเชื่อมสำหรับวิศวกร: เหล็กกล้าคาร์บอน

Welding Metallurgy for Engineers: Carbon Steel

โดย อิศรทัต พึ่งอัน

สงวนลิขสิทธิ์ พ.ศ.2567 ตาม พ.ร.บ.ลิขสิทธิ์พ.ศ.2537 ไม่อนุญาตให้คัดลอกลอกเลียน ดัดแปลง ทำซ้ำ จัดพิมพ์ หรือกระทำการอื่นใด โดยวิธีการใด ๆ ในรูปแบบใด ๆ ไม่ว่าส่วนหนึ่งส่วนใดของหนังสือเล่มนี้

จัดทำโดย อิศรทัต พึ่งอัน

พิมพ์ครั้งที่ 1 หนังสืออิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Book) พ.ศ. 2567
272 หน้า : ไม่รวมปก

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

อิสรทัต พึ่งอัน.

โลหะวิทยาการเชื่อมสำหรับวิศวกร: เหล็กกล้าคาร์บอน = Welding metallurgy for engineers:
carbon steel.-- กรุงเทพฯ : ม.ป.พ., 2567.

272 หน้า

1. โลหะ – การเชื่อม. 2. โลหะวิทยา. 3. เหล็กกล้าคาร์บอน. I. ชื่อเรื่อง.

671.52

ISBN (e-book) 978-616-616-194-6

เอกสารฉบับนี้ จัดทำขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการปฏิบัติงานเท่านั้น ผู้จัดทำมิอาจรับผิดชอบความผิดพลาดใด ๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากการปฏิบัติงานที่ไม่ถูกต้องสอดคล้องกับมาตรฐาน ข้อกำหนด หรือข้อบังคับทางกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

คำนิยม

การเชื่อมโลหะถือเป็นศิลปะและศาสตร์ที่รวมเอาความรู้ด้านเทคนิคและความชำนาญในการปฏิบัติมาไว้ด้วยกัน ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทั้งในภาคการผลิต การก่อสร้าง และการซ่อมบำรุง หนังสือ "โลหวิทยาการเชื่อมสำหรับวิศวกร" จึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับผู้ที่ต้องการเรียนรู้และพัฒนาทักษะในด้านนี้อย่างจริงจัง

หนังสือเล่มนี้ได้รวบรวมเนื้อหาที่ครอบคลุมและลึกซึ้งเกี่ยวกับโลหะวิทยา ความสามารถในการเชื่อม และเทคนิคการทดสอบความสามารถในการเชื่อม ตั้งแต่พื้นฐานจนถึงระดับที่มีความซับซ้อน เป็นเอกสารที่เหมาะสมสำหรับทั้งนักเรียน นักศึกษา และผู้ปฏิบัติงานในสาขานี้ ด้วยการนำเสนอที่ชัดเจนและเป็นระบบ ช่วยให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจและนำความรู้ไปใช้ในการปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผู้เขียนได้อธิบายถึงหลักการทางโลหะวิทยาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมอย่างละเอียด รวมถึงการจัดการกับปัญหาที่อาจเกิดขึ้นและวิธีการแก้ไขที่เหมาะสม นอกจากนี้ ยังมีกรณีศึกษาจากประสบการณ์จริงที่ช่วยให้ผู้อ่านสามารถเห็นภาพรวมของการนำทฤษฎีไปใช้ในสถานการณ์จริง

ด้วยการผสมผสานระหว่างทฤษฎีและการปฏิบัติ อีกทั้งผู้เขียนมีประสบการณ์ด้านการสอนในรายวิชานี้ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ และ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการเชื่อม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เป็นเวลามากกว่าสิบปี หนังสือเล่มนี้จึงเป็นแหล่งข้อมูลที่ทรงคุณค่าและเป็นแรงบันดาลใจสำหรับผู้ที่ต้องการก้าวหน้าในสาขางานเชื่อม และเสริมสร้างความรู้ความเข้าใจในโลหะวิทยาได้อย่างมั่นคงและมั่นใจ

ขอแนะนำให้ผู้อ่านทุกท่านที่สนใจในงานเชื่อมและโลหวิทยาได้ศึกษาและเรียนรู้จากหนังสือเล่มนี้อย่างตั้งใจ เพราะความรู้ที่ได้จะเป็นพื้นฐานที่แข็งแกร่งในการพัฒนาทักษะและความชำนาญต่อไปในอนาคต

รศ. ดร.บวร โชค ผู้พัฒนา

หัวหน้าศูนย์วิจัยและบริการวิศวกรรมการเชื่อม (KINGWELD)

ผู้ก่อตั้ง หลักสูตรวิศวกรรมการเชื่อม มจร.

คำนำ

กระบวนการเชื่อมเป็นหนึ่งในกระบวนการผลิต (Manufacturing Processes) ที่ได้รับความนิยมและความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากแทรกตัวอยู่ในแทบทุกอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมก่อสร้าง การผลิตและประกอบเหล็ก ปิโตรเลียมปิโตรเคมี ยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ และรวมถึงอากาศยาน อย่างไรก็ตามความรู้ทางด้านกระบวนการเชื่อมและที่เกี่ยวข้องยังคงแพร่หลายในวงจำกัด

องค์ความรู้ทางด้านการเชื่อมสามารถแยกองค์ประกอบได้ 4 ด้าน คือ กระบวนการเชื่อม การออกแบบและมาตรฐานการเชื่อม การตรวจสอบโดยไม่ทำลาย และโลหวิทยาการเชื่อม แม้ว่าการศึกษาด้านการเชื่อมค่อนข้างจำกัดอยู่แล้วในแทบทุกด้าน แต่ทางด้านโลหวิทยาการเชื่อมยังได้รับความสนใจน้อยที่สุดใน 4 ด้าน แม้ว่าจะมีความสำคัญในแง่ที่ว่า การเชื่อมโดยส่วนใหญ่จะต้องใช้โลหะ และมีความร้อนมาเกี่ยวข้อง ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของวัสดุ ทั้งในระหว่างผลิต และเมื่อนำไปใช้งาน ไม่ว่าจะเป็น สมบัติทางการเชื่อม สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพ

เพื่อเป็นการส่งเสริมการเรียนรู้ทางด้านโลหวิทยาการเชื่อม ผู้แต่งจึงได้รวบรวมและพัฒนาหนังสือเล่มนี้ขึ้นมา เพื่อให้ผู้สนใจสามารถศึกษาได้โดยง่ายยิ่งขึ้น หนังสือ **โลหวิทยาการเชื่อมสำหรับวิศวกร: เหล็กกล้าคาร์บอน** เล่มนี้ถือเป็นหนังสือเล่มแรกในอนุกรมของการเรียนการสอนทางด้านโลหวิทยาการเชื่อม โดยคาดว่าจะมีการจัดทำหนังสือเล่มอื่น ๆ ต่อ เช่น

- โลหวิทยาการเชื่อมสำหรับวิศวกร: เหล็กกล้าไร้สนิม
- โลหวิทยาการเชื่อมอุปกรณ์สำหรับการผลิตอาหารและยา
- การเชื่อมวัสดุใช้งานอุณหภูมิสูง

การเรียบเรียงของหนังสือเล่มนี้ เป็นไปในแนวทางของผลกระทบจากการทำงานในทางปฏิบัติ มิได้เน้นที่ทฤษฎีทางโลหวิทยามากนัก รวมถึงไม่เน้นการคำนวณ แต่เน้นการประยุกต์ใช้ทฤษฎีทางโลหวิทยา (Metallurgy) การส่งถ่ายความร้อน (Heat Transfer) รวมถึงกระบวนการเชื่อม (Welding Processes) เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบจากกระบวนการดังกล่าวต่อวัสดุในแง่ของการเปลี่ยนแปลงทางโลหวิทยา ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการเชื่อมทั้งในการประกอบ (Fabrication) และการใช้งานตามความตั้งใจ (Intended Uses)

การเลือกใช้คำศัพท์ที่แปลมาจากภาษาอังกฤษ เป็นสิ่งที่มีความยุ่งยากและสับสนพอสมควร ผู้แต่งพยายามอ้างอิงหนังสือและเอกสารภาษาไทยที่เกี่ยวข้องให้มากที่สุด โดยเฉพาะศัพท์บัญญัติผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และพจนานุกรมศัพท์การเชื่อม สำนักงานราชบัณฑิตยสภา ซึ่งอาจไม่สอดคล้องกับหนังสือภาษาไทยที่ได้รับการตีพิมพ์มาแล้วก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ยังได้เพิ่ม ภาคผนวก ข นิยามคำศัพท์ (ภาษาอังกฤษ-ภาษาไทย) เพื่อให้ผู้อ่านสามารถทำความเข้าใจได้ดีขึ้นในการหาความเชื่อมโยงระหว่างคำศัพท์เฉพาะในภาษาอังกฤษกับคำศัพท์ที่แปลเป็นภาษาไทย

สำหรับข้อมูลอ้างอิงต่าง ๆ ไม่ว่าจะอยู่ในรูปแบบตาราง รูปภาพประกอบ ตลอดทั้งในเนื้อหาและภาคผนวก เป็นเพียงส่วนหนึ่งที่นำมาใส่เป็นตัวอย่างเท่าที่จำเป็นเพื่อความเข้าใจในการศึกษาเท่านั้น ผู้อ่านสามารถเข้าถึงข้อมูลเอกสารดังกล่าวอย่างสมบูรณ์ได้ โดยผ่านข้อมูลรายการการอ้างอิงเอกสารที่ระบุไว้

ผู้แต่งหวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ในการให้แนวคิดทางด้านโลหวิทยาการเชื่อมให้แก่ผู้อ่านและผู้สนใจสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำงานปฏิบัติจริง เพื่อพัฒนางานการเชื่อมของประเทศไทยให้ก้าวหน้ายิ่งขึ้น รวมถึงเป็นการกระตุ้นให้เกิดความตระหนักถึงความสำคัญและการศึกษาทางวิศวกรรมการเชื่อม โดยเฉพาะทางด้านโลหวิทยาการเชื่อมต่อไป

อิสรทัต พิงอัน

ผู้แต่ง

กิตติกรรมประกาศ

หนังสือเล่มนี้เกิดขึ้นได้จากความมุ่งมั่นในการพัฒนาเทคโนโลยีการเชื่อมของประเทศ เพื่อความก้าวหน้าและประสิทธิภาพ รวมถึงความปลอดภัยสาธารณะจากการโครงสร้างหรือชิ้นงานเชื่อม ผู้แต่งขอขอบพระคุณ อาจารย์อาทร สนใจยุทธ หรือที่รู้จักกันในนาม “อาจารย์ปู” ที่ผลักดันให้ผู้แต่งได้เข้ามาอยู่ในแวดวงการเชื่อม ผลักดันให้ไปศึกษาต่อ ขอขอบคุณ รศ.วชิระ มีทอง ซึ่ง ณ ขณะนั้นเป็นหัวหน้าศูนย์เทคโนโลยีซ่อมบำรุงรักษา มจร. สำหรับการส่งเสริมให้ได้รับทุนกระทรวงวิทยาศาสตร์ เพื่อไปศึกษาต่อ ณ The Ohio State University (OSU) ประเทศสหรัฐอเมริกา ในระดับ ปริญญาโท และปริญญาเอก ที่ขาดไม่ได้ คือ รศ. ดร.บวรโชค ผู้พัฒนา กับความช่วยเหลือทุกด้าน เพื่อให้การไปศึกษาต่อที่ OSU เป็นไปได้ด้วยดี

ไม่เพียงเท่านั้น เมื่อเรียนจบกลับมาทำงาน ณ ศูนย์เทคโนโลยีซ่อมบำรุงรักษา มจร. ยังได้รับการสนับสนุนช่วยเหลือจากหลาย ๆ ท่าน ไม่ว่าจะเป็น ผศ. เสริมสุข บัวเจริญ และ “อาจารย์เขียว” ที่คอยแนะนำและคอยดูแลอยู่ห่าง ๆ ทั้งในแง่หลักการและการใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรม ขอขอบคุณน้อง ๆ พี่ ๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งหลาย ไม่ว่าจะอยู่ในสถานะผู้ร่วมงาน หรือนักศึกษา ที่ให้การสนับสนุนและสร้างปัญหาอย่างหลากหลาย ทำให้ได้คิดวิเคราะห์แก้ไขจนกลายมาเป็นองค์ความรู้เพื่อให้สามารถเผยแพร่ต่อไปได้

สุดท้ายนี้ ต้องขอขอบคุณครอบครัว ที่ให้การดูแลและสนับสนุน จนมีหน้าที่การงาน ตลอดจนโอกาสที่จะรับใช้และเผยแพร่ความรู้ต่อสังคมในวันนี้

อิศรทัต พึ่งอัน

ผู้แต่ง

สารบัญ

	หน้า
คำนิยาม	ก
คำนำ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
บทที่ 1 บทนำ (Introduction)	1
1.1 ปฏิกิริยาทางโลหวิทยา (Metallurgical Reactions)	1
1.2 โลหวิทยากายภาพของเหล็กกล้า (Physical Metallurgy of Steel)	3
1.3 แผนภูมิเฟสของเหล็กกล้าคาร์บอน (Phase Diagram of Carbon Steel)	4
1.4 แผนภูมิการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal Transformation Diagram)	7
1.5 ธาตุอัลลอยผสมในเหล็กกล้า (Alloying Elements)	9
1.6 ความสามารถในการทำให้แข็ง (Hardenability)	14
1.7 กลไกการทำให้แข็งแรงขึ้น (Strengthening Mechanisms)	18
1.8 การแบ่งประเภทของเหล็กกล้า (Classification of Steels)	20
1.9 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steels)	28
บทที่ 2 การถ่ายเทความร้อนและการไหลของของเหลว (Heat Flow and Fluid Flow)	31
2.1 ประเภทของจุดกำเนิดการแข็งตัว (Types of Solidification Nucleation)	32
2.2 ตัวแปรกำหนดในการแข็งตัว (Solidification Parameters)	35
2.3 รูปแบบการแข็งตัว (Solidification Modes)	36
2.4 การไหลของของเหลวในรอยเชื่อม (Weld Pool Convection)	42
บทที่ 3 บริเวณต่าง ๆ ในรอยเชื่อมแบบหลอม (Zones in Fusion Welding)	47
3.1 การแบ่งบริเวณต่าง ๆ ในรอยเชื่อม (Zones in Weldment)	48
3.1.1 บริเวณผสม (Composite Zone)	50
3.1.2 บริเวณเปลี่ยนแปลง (Transition Zone)	54

3.1.3	บริเวณที่ไม่ผสม (Unmixed Zone)	54
3.1.4	บริเวณหลอมละลายบางส่วน (Partially Melted Zone)	57
3.1.5	บริเวณกระทบร้อนจริง (True Heat Affected Zone)	61
3.2	การเกิดผลึกใหม่และการเติบโตของเกรน (Recrystallization and Grain Growth)	63
3.3	การเปลี่ยนเฟส (Phase Transformation)	65
3.4	การตกตะกอน (Precipitation)	68
บทที่ 4	บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone)	71
4.1	ส่วนต่าง ๆ ของบริเวณกระทบร้อน	71
4.2	ผลของความร้อนจากการเชื่อมต่อความแข็งแรงในเหล็กกล้าคาร์บอน	73
4.3	การเกิดบริเวณเปราะเฉพาะที่ (Local Brittle Zone)	75
4.4	ผลของการให้ความร้อนหลังการเชื่อมไม่เหมาะสม (Inappropriate Post Weld Heat Treatment)	77
4.5	การหยาบขึ้นของตะกอน (Precipitate Coarsening)	81
บทที่ 5	โลหะเชื่อม (Weld Metal)	83
5.1	โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อม (Weld Metal Microstructures)	84
5.2	ความทนแรงฟาดกระทบ (Toughness) ของโลหะเชื่อม	86
5.3	โครงสร้างจุลภาคและความแข็งของโลหะเชื่อม (Microstructures and Hardness of Weld Metal)	88
5.4	ผลกระทบของรูปแบบการแข็งตัว (Effect of Solidification Modes)	90
บทที่ 6	ความสามารถในการเชื่อม (Weldability)	95
6.1	ประเภทข้อบกพร่องในงานเชื่อม (Types of Weld Defects)	95
6.2	การแตกร้าวร้อน (Hot Cracking)	96
6.2.1	ประเภทของการแตกร้าวร้อน (Types of Hot Cracking)	97
6.2.2	ทฤษฎีเกี่ยวกับการแตกร้าวร้อน (Hot Cracking Theories)	99
6.2.3	ปัจจัยที่ส่งเสริมให้เกิดการแตกร้าวร้อน	103
6.2.4	การแตกร้าวเนื่องจากการเกิดของเหลว (Liquation Cracking)	104
6.3	การแตกร้าวจากการให้ความร้อนซ้ำหรืออบคลายเครียด (Reheat or Stress-Relief Cracking)	106
6.3.1	สภาวะที่ส่งเสริมให้เกิดการแตกร้าวจากการให้ความร้อนซ้ำ (Condition for Reheat Cracking)	106
6.3.2	กลไกการแตกร้าวจากการให้ความร้อนซ้ำ (Mechanism for Reheat Cracking)	106

6.4 การแยกชั้น (Lamellar Tearing)	108
6.5 การแตกร้าวเนื่องจากการปนเปื้อนทองแดง (Copper Contamination Cracking)	109
บทที่ 7 การแตกร้าวเนื่องจากไฮโดรเจน (Hydrogen Induced Cracking; HIC)	113
7.1 ปัจจัยที่ส่งเสริมให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากไฮโดรเจน	114
7.2 การป้องกันการแตกร้าวเนื่องจากไฮโดรเจน	119
7.3 การป้องกันการแตกร้าวเนื่องจากไฮโดรเจนตามมาตรฐาน AWS D1.1 Annex H	121
บทที่ 8 พฤติกรรมการแตกร้าว (Fracture Behavior)	129
8.1 สมบัติทางกลของวัสดุ (Material Properties)	129
8.2 ประเภทพื้นผิวการแตก (Types of Fracture Surfaces)	138
8.3 ประเภทของการแตกร้าว (Types of Cracking)	141
8.3.1 การแตกร้าวร้อน (Hot Cracking)	142
8.3.2 การแตกร้าวอุ่น (Warm Cracking)	142
8.3.3 การแตกร้าวเย็น (Cold Cracking)	145
บทที่ 9 วัสดุสิ้นเปลือง (Consumables)	147
9.1 วัสดุสิ้นเปลืองและการเลือกใช้กระบวนการเชื่อม	147
9.2 กระบวนการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding; SMAW)	148
9.3 กระบวนการเชื่อมอาร์กแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding; GMAW)	151
9.4 กระบวนการเชื่อมอาร์กไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Wire Arc Welding; FCAW)	153
9.5 การป้องกันออกซิเดชันในรอยเชื่อม (Weld Oxidation Protection)	156
9.5.1 แก๊สปกคลุม (Shielding Gases) ที่ใช้ในการเชื่อม	157
9.5.2 ฟลักซ์ปกคลุม (Flux Covered)	160
9.5.3 ผลกระทบของสิ่งเจือปนและปริมาณออกซิเจน	165
9.6 คvdn ละอองโลหะจากการเชื่อม (Welding Fume)	165
9.7 การลดการเกิดควันละอองโลหะจากการเชื่อม (Welding Fume Generation Suppression)	172
9.8 เทอร์มาชีลด์ (Thermashield): The Fume Reducer	180

บทที่ 10 การทดสอบความสามารถในการเชื่อม (Weldability Testing)	187
10.1 ประเภทของการแตกร้าว (Types of Cracking)	187
10.2 ประเภทของการทดสอบความสามารถในการเชื่อม	190
10.3 การทดสอบแบบตัวแทน (Representative Test)	191
10.4 การทดสอบแบบจำลอง (Simulative Test)	195
10.5 การทดสอบความเหนียวร้อน (Hot Ductility Test)	200
 แบบฝึกหัดท้ายเล่ม	 203
เอกสารอ้างอิง (References)	207
ภาคผนวก ก ข้อมูลวัสดุที่เกี่ยวข้อง (บางส่วน)	213
ภาคผนวก ข นิยามคำศัพท์ (ภาษาอังกฤษ-ภาษาไทย)	240
ดัชนี (Index)	247

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ผลกระทบของส่วนผสมทางเคมีและประวัติการได้รับความร้อน	2
รูปที่ 1.2 แผนภูมิเฟสของเหล็กกล้าคาร์บอน (Fe-Fe ₃ C Phase Diagram)	5
รูปที่ 1.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไฮโปยูเทกตอยด์ (Hypoeutectoid Steel)	6
รูปที่ 1.4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไฮโปยูเทกตอยด์ (Hypoeutectoid Steel)	6
รูปที่ 1.5 ภาพจำลองการเกิดโครงสร้างเพอร์ไลต์	7
รูปที่ 1.6 แผนภูมิการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal Transformation Diagram: ITT Diagram)	8
รูปที่ 1.7 แผนภูมิการเปลี่ยนเฟสที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Continuous-Cooling Diagram: CCT Diagram)	9
รูปที่ 1.8 แผนภูมิการเปลี่ยนเฟสที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง (CCT Diagram) เมื่อเพิ่มปริมาณธาตุอัลลอย	11
(ก) ผลของอัตราการเย็นตัว (ข) เส้นการเปลี่ยนเฟสเลื่อนจากการใส่อัลลอย	
รูปที่ 1.9 การทดสอบแบบ Jominy Test	15
รูปที่ 1.10 การวัดผลการทดสอบแบบ Jominy Test	16
รูปที่ 1.11 ความแข็งของวัสดุที่ปริมาณคาร์บอนแตกต่างกัน	17
รูปที่ 1.12 ความแข็งของวัสดุที่มีปริมาณธาตุอัลลอยแตกต่างกัน	17
รูปที่ 1.13 การบิดเบี้ยวของโครงสร้างผลึกเกิดเป็นบริเวณความเครียด	18
รูปที่ 1.14 ความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกและบริเวณรอยต่อเกรน	19
รูปที่ 1.15 การเกิดตะกอนขึ้นที่พื้นเกรน	20
(ก) ไม่มีความยึดโยง (Non-coherency) (ข) มีความยึดโยง (Coherency)	
รูปที่ 1.16 ตัวอย่างแนวโน้มความแข็งแรงของวัสดุที่ได้จากการชุบแข็ง	20
รูปที่ 1.17 การจำแนกประเภทของเหล็กกล้า	22
รูปที่ 1.18 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI/SAE 1010	23
รูปที่ 1.19 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI/SAE 1040	23
รูปที่ 1.20 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI/SAE 1213	24
รูปที่ 1.21 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด ASTM A1	26
รูปที่ 1.22 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI/SAE 1213	27
รูปที่ 1.23 พัฒนาการของเหล็กกล้าไร้สนิมจากการเพิ่มธาตุอัลลอย	29
รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดจุดกำเนิดการแข็งตัวของโลหะ	33
รูปที่ 2.2 การกำเนิดในทิศที่เติบโตง่าย	34

รูปที่ 2.3 ลักษณะการกำเนิดและการเติบโตของโลหะแข็งตัว	38
รูปที่ 2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราการแข็งตัวต่อรูปแบบการแข็งตัวของน้ำโลหะ	39
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแข็งตัวกับความเร็วในการเชื่อม	40
รูปที่ 2.6 ผลกระทบของอัตราเร็วในการเชื่อมต่อลักษณะรูปร่างของบ่อหลอม	40
(ก) และ (ข) ไม่มีเกรนตรงกลาง (ค) และ (ง) มีเกรนตรงกลาง	
รูปที่ 2.7 การแข็งตัวและเติบโตของเกรนแบบแข่งขัน	42
รูปที่ 2.8 ทิศทางการไหลของน้ำโลหะ (ก) แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	43
(ข) และ (ค) แรงตึงผิว (ง) แรงลอยตัว (จ) แรงลากจากถ้ำอาร์ก	
รูปที่ 3.1 บริเวณต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการเชื่อมแบบหลอมละลาย	47
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแผนภูมิเฟสในสภาวะสมดุลกับบริเวณต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อม	49
รูปที่ 3.3 การคำนวณอัตราการเจริญ	51
รูปที่ 3.4 การเกิดรอยต่อเกรนแบบต่าง ๆ	52
รูปที่ 3.5 การเกิดแถบมาร์เทนไซต์ (Martensite Band) ของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน (2.25Cr-Mo)	53
ด้วยลวดเชื่อมสแตนเลส (ER308L) รองพื้น:	
(บน) โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี (ล่าง) ความแข็ง	
รูปที่ 3.6 บริเวณที่ไม่ผสมใกล้ขอบแนวเชื่อม	55
รูปที่ 3.7 บริเวณที่ไม่ผสมระหว่างการเชื่อม Inconel 657 (ซ้าย) กับ AISI 310 (ขวา)	55
ด้วยลวด Inconel 617	
รูปที่ 3.8 การเกิดน้ำโลหะในชิ้นงานเชื่อมอะลูมิเนียม Al-4.5Cu	59
รูปที่ 3.9 การหลอมเหลวของรอยต่อเกรนอื่นเนื่องมาจากการแยกตัว	60
รูปที่ 3.10 การเกิดแพร่ของโลหะเชื่อมหลอมเหลวในลักษณะท่อจากการเชื่อมโลหะนิกเกิลเกรด Inconel 718	60
รูปที่ 3.11 ผลกระทบของอัตราความร้อนเข้าสู่ความกว้าง และความแข็งในบริเวณกระทบร้อน	62
(ก) และ (ข) ความร้อนเข้าสู่สูง (ค) และ (ง) ความร้อนเข้าต่ำ	
รูปที่ 3.12 ผลจากการเกิดผลึกใหม่และการเติบโตของเกรนต่อสมบัติทางกล	64
(ซ้าย) ผลจากการแข็งตัวงาน (Work Hardening)	
(ขวา) ผลจากกระบวนการเกิดผลึกใหม่และการเติบโตของเกรน	
รูปที่ 3.13 การเติบโตของเกรนออสเตไนต์ (Austenite Grains) ในวัสดุ 2.25Cr-0.5Mo ที่บริเวณกระทบร้อน	64
เกรนละเอียด (FGHAZ) (ซ้าย) ที่อุณหภูมิ 690-700 °C ในช่วงเริ่มต้น (กลาง) อุณหภูมิ 690-700 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ (ขวา) อุณหภูมิ 690-700 °C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง	

รูปที่ 3.14 ความแข็งของบริเวณกระทบร้อนในวัสดุ (บน) ที่แข็งจากงาน และ (ล่าง) ที่แข็งจากการตกตะกอน	65
รูปที่ 3.15 แผนภูมิ CCT ของเหล็กกล้าคาร์บอนเย็นตัวจากอุณหภูมิ 800 °C ถึง 500 °C	67
รูปที่ 3.16 การเปลี่ยนเฟส (Phase Transformation) จากเฟอร์ไรต์ (Ferrite) เป็นออสเทนไนต์ (Austenite) ในวัสดุ 2.25Cr-0.5Mo ที่บริเวณกระทบร้อนเกรนหยาบ (CGHAZ) (ซ้าย) อุณหภูมิ 690-700 °C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง (กลาง) อุณหภูมิ 730 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ (ขวา) อุณหภูมิ 730 °C เป็นเวลา 7 ชั่วโมง	67
รูปที่ 3.17 การตกตะกอนของวัสดุ (ก) แผนภูมิเฟส (ข) ประวัติอุณหภูมิ (ค) C-Curve (ง) ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาค (จ) การกระจายความแข็ง	69
รูปที่ 3.18 แผนภาพการตกตะกอนสัมพันธ์กับอัตราการเย็นตัว	70
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแผนภูมิเฟส (Phase Diagram) กับบริเวณกระทบร้อนจริง	72
รูปที่ 4.2 ความแข็งของชิ้นงานเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการอบอ่อนและเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็น	73
รูปที่ 4.3 อุณหภูมิการอบอ่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็นในปริมาณต่างกัน	74
รูปที่ 4.4 ลำดับการเกิดบริเวณกระทบร้อนวิกฤตที่มีขนาดเกรนใหญ่ (ICGHAZ)	75
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคจากการให้ความร้อนซ้ำ (a) กล้องจุลทรรศน์แสง (b) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	76
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคจากการให้ความร้อนซ้ำ (a) 680 °C (b) 820 °C (c) 1050 °C ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ลูกศรสีดำ คือ มาร์เทนไซต์) (d) พลังงานในการรับแรงฟาดกระทบ (e) ความแข็ง	76
รูปที่ 4.7 การเตรียมชิ้นงานทดลองเชื่อมวัสดุ P91 ด้วยลวดเชื่อม ER90s-B9 และ E90-B9 สำหรับการทดสอบแรงฟาดกระทบ	78
รูปที่ 4.8 ความสามารถในการรับแรงฟาดกระทบและความแข็งของชิ้นงานที่ผ่าน PWHT อุณหภูมิ 710 °C, 760 °C, 810 °C, และ 860 °C	79
รูปที่ 4.9 ความสามารถในการรับแรงฟาดกระทบและความแข็งของชิ้นงานที่ผ่าน PWHT อุณหภูมิ 710 °C ด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน	80
รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงของตะกอนเนื่องจากความร้อนจากการเชื่อม	81
รูปที่ 5.1 ตัวอย่าง CCT Diagram โลหะเชื่อม (Weld Metal) ของเหล็กกล้าคาร์บอน	84

รูปที่ 5.2 ตัวอย่าง โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน (จากกล้องจุลทรรศน์แสง)	85
A: grain boundary ferrite; B: polygonal ferrite; C: Widmanstatten ferrite; D: acicular ferrite; E: upper Bainite; F: lower Bainite	
รูปที่ 5.3 พลังงานที่ดูดซับจากแรงฟาดกระทบบของวัสดุต่างชนิด	87
รูปที่ 5.4 โครงสร้างจุลภาค (จากกล้องจุลทรรศน์แสง) (a) มาร์เทนไซต์ (Martensite) (b) เบไนต์(Bainite)	89
(c) อะซิคูล่าเฟอร์ไรต์ (Acicular Ferrite) และเฟอร์ไรต์ที่รอยต่อเกรน (Grain Boundary Ferrite) (d) เพอร์ไลต์และเพอร์ไลต์ (Pearlite)	
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและปริมาณคาร์บอน	90
รูปที่ 5.6 การออกแบบรอยต่อ (Joint Design) สำหรับการเชื่อมเหล็กหล่อ	91
รูปที่ 5.7 ตำแหน่งการทดสอบการรับแรงฟาดกระทบบ (Impact Toughness)	91
(ซ้าย) ระบุรอยบาก (Notch) (ขวา) การดูดซับพลังงาน	
รูปที่ 5.8 โครงสร้างจุลภาคและรูปแบบการแข็งตัวของโลหะเชื่อม	92
รูปที่ 6.1 การแตกร้าวร้อนบริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อม (Centerline Cracking)	98
รูปที่ 6.2 การแตกร้าวร้อน (ด้านล่างของภาพ) แสดงหลักฐานของการเกิดฟิล์มของน้ำโลหะ	98
รูปที่ 6.3 แผนภาพของ Generalized Theory โดย J.C. Borland	100
รูปที่ 6.4 แผนภาพของ Modified Generalized Theory โดย Matsuda	101
รูปที่ 6.5 แผนภาพของ Technological Strength Theory โดย Prokhorov	102
รูปที่ 6.6 แผนภาพแสดงช่วงอุณหภูมิการแตกร้าวจากการแข็งตัว	103
รูปที่ 6.7 การเกิดน้ำโลหะของวัสดุเหล็กเกรด IN617 ที่อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 1330 °C	105
(A) ระยะเวลา 221.07 วินาที (B) ระยะเวลา 272.05 วินาที (C) ระยะเวลา 277.05 วินาที (D) ระยะเวลา 418.11 วินาที	
รูปที่ 6.8 วัฏจักรอุณหภูมิในระหว่างการเชื่อมและการแตกร้าวจากการให้ความร้อนซ้ำ	107
(ก) แสดงลักษณะเกรนเดิม (ข) การแพร่ของสิ่งเจือปน (ค) การเกิดความเค้น (ง) การเกิดรอยแตกร้าว	
รูปที่ 6.9 แผนภาพแสดงการแยกชั้น	109
รูปที่ 6.10 โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณกระทบบร้อนโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ของการเชื่อม	111
เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับทองแดงบริสุทธิ์ ที่ผ่านการอุ่นขึ้นงานทองแดงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (ก) 100 องศาเซลเซียส (ข) 200 องศาเซลเซียส (ค) 300 องศาเซลเซียส (ง) 400 องศาเซลเซียส	

รูปที่ 6.11 (ซ้าย) บริเวณรอยต่อของชั้นรองพื้นด้วยกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ขวา) องค์ประกอบเคมีเคมีจากบริเวณกระทบร้อนไปยังโลหะเชื่อม	111
รูปที่ 6.12 การแทรกตัวของทองแดงตามรอยต่อเกรนการแข็งตัว (ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพ จากกล้องจุลทรรศน์แสง) (บน) โครงสร้างจุลภาค (ล่าง) เส้นทางการแทรกตัวของทองแดง	112
รูปที่ 7.1 การแตกร้าวเนื่องจากไฮโดรเจนจากฐานแนวเชื่อม (Weld Toe) ไปยังบริเวณกระทบร้อนเกรนละเอียด (CGHAZ)	113
รูปที่ 7.2 รอยแตกร้าวเนื่องจากไฮโดรเจน จากการทดสอบแบบรอยต่อแนวเชื่อมตัววาย (Y-Groove Test)	114
รูปที่ 7.3 ปัจจัยร่วมของการแตกร้าวเนื่องจากไฮโดรเจน	115
รูปที่ 7.4 การแพร่ของไฮโดรเจนเข้าไปในรอยเชื่อม	116
รูปที่ 7.5 ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	117
รูปที่ 7.6 ปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเชื่อมแต่ละประเภท	118
รูปที่ 7.7 พื้นที่แสดงความเสี่ยงของการแตกร้าวเนื่องจากไฮโดรเจน	122
รูปที่ 7.8 อัตราการเย็นตัวที่ต้องการเมื่อระบุความแข็งแรงและปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า	123
รูปที่ 7.9 ปริมาณความร้อนเข้าที่ต้องการเมื่อกำหนดความหนาและอัตราการเย็นตัว	124
รูปที่ 8.1 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดจากการทดสอบแรงดึง	130
รูปที่ 8.2 การทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ส (Vicker Hardness Test)	132
รูปที่ 8.3 การทดสอบแรงฟาดกระทบ	133
รูปที่ 8.4 การเปรียบเทียบรูปแบบของความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุแต่ละกลุ่ม	133
รูปที่ 8.5 การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ของวัสดุจากการคืบ	134
รูปที่ 8.6 การขยายตัวของรอยแตกร้าวจากการล้า	135
รูปที่ 8.7 รูปแบบของจุดรวมความเค้น	136
รูปที่ 8.8 ลักษณะความเสียหายจากการล้า	137
รูปที่ 8.9 ผลกระทบของรอยเชื่อมต่อความสามารถในการรับการล้าของวัสดุ	138
รูปที่ 8.10 ภาพร่างผิวรอยแตกร้าวเมื่อเทียบกับเกรนของวัสดุ (ซ้าย) แดกตามรอยต่อเกรน (กลาง) แดกผ่าเกรน (ขวา) แดกผ่าเกรนเป็นบริเวณกว้าง	139
รูปที่ 8.11 การแตกเปราะผ่าเกรน (ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด)	140
รูปที่ 8.12 การแตกเหนียวผ่ารอยต่อเกรน (ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด)	141

รูปที่ 8.13 การแตกร้าวร้อนที่บริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อม	142
รูปที่ 8.14 การตกตะกอน (สีขาว) ที่กระจายบนพื้นเกรนเฟอร์ไรต์-มาร์เทนไซต์ และตามรอยต่อเกรนของวัสดุเกรด SA213 T91 (ภาพอิเล็กทรอนิกส์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด)	143
รูปที่ 8.15 การแตกร้าวอุ่น เกิดขึ้นขณะให้ความร้อนหลังการเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 347 (ภาพกล้องจุลทรรศน์แสง)	144
รูปที่ 9.1 กระบวนการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW)	149
รูปที่ 9.2 การขึ้นประเภทลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	150
รูปที่ 9.3 กระบวนการเชื่อมอาร์กแก๊สปกคลุม (GMAW)	151
รูปที่ 9.4 การขึ้นประเภทลวดเชื่อมเชื่อมอาร์กแก๊สปกคลุม	153
รูปที่ 9.5 ลักษณะของลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์	154
รูปที่ 9.6 การขึ้นประเภทลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์	155
รูปที่ 9.7 ผลกระทบของชนิดแก๊สปกคลุมและแก๊สผสมต่อโครงสร้างแนวเชื่อม	159
รูปที่ 9.8 กระบวนการเชื่อมอาร์กได้ฟลักซ์ (SAW)	163
รูปที่ 9.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนกับดัชนีความเป็นด่าง	164
รูปที่ 9.10 สิ่งเจือปน (Inclusion) ที่พบในโลหะเชื่อม	165
รูปที่ 9.11 การกระจายขนาดอนุภาคของควันละอองโลหะจากการเชื่อม (ซ้าย) ที่กระแสเชื่อม 100 A (ขวา) ที่กระแสเชื่อม 200 A	166
รูปที่ 9.12 อัตราการเกิดควันละอองโลหะจากกระบวนการเชื่อม	166
รูปที่ 9.13 กลไกการเกิดฝุ่นควันละอองโลหะจากการเชื่อม	168
รูปที่ 9.14 ตัวอย่างภาพร่างของตู้ดูดควัน (Fume Hood) ตามมาตรฐาน AWS F1.2	171
รูปที่ 9.15 ตัวอย่างของวัสดุกรอง (เส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว หน้า 3 นิ้ว)	172
ภายหลังการทดลองเชื่อมในกระบวนการเชื่อมอาร์กไร้ฟลักซ์ (FCAW) เป็นเวลา 1 นาที	
รูปที่ 9.16 การลดการเกิดควันละอองโลหะจากการเชื่อม (Percentage) ของลวดเชื่อม FLE Gen I	173
รูปที่ 9.17 อัตราการเกิดควันละอองโลหะ (mg/min) ควันละอองโลหะจากการเชื่อมของลวดเชื่อม FEL Gen I ที่มีความเข้มข้นของสารยึดเกาะ (Binder) ที่ต่างกัน	174
รูปที่ 9.18 อัตราการเกิดควันละอองโลหะ (g/min) ของลวดเชื่อม เกรด E7010 ที่ปริมาณอนุภาคนาโนต่างกัน	175
รูปที่ 9.19 อัตราการเกิดควันละอองโลหะ (g/min) ของลวดเชื่อม เกรด E6013 ที่ปริมาณอนุภาคนาโนต่างกัน	175
รูปที่ 9.20 (บน) แบบจำลองการเกิดควันละอองโลหะ (ล่าง) แบบจำลองการลดควันละอองโลหะ	176

รูปที่ 9.21 อัตราการเกิดวันละองโลหะการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมขนาด 2.6 มิลลิเมตร	178
รูปที่ 9.22 อัตราการเกิดวันละองโลหะการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมขนาด 3.2 มิลลิเมตร	178
รูปที่ 9.23 โครงสร้างจุลภาคด้านบนของเนื้อเชื่อม (ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด)	179
รูปที่ 9.24 การติดตั้งอุปกรณ์ลดการเกิดวันละองโลหะจากการเชื่อม (Thermashield)	181
รูปที่ 9.25 ประสิทธิภาพของเทอร์มาชีลด์ (บน) ปริมาณวันละองโลหะจากการเชื่อมที่เกิดขึ้น (ล่าง) อัตราการลดการเกิดวันละองโลหะจากการเชื่อม	182
รูปที่ 9.26 ความสามารถในการลดวันละองโลหะจากการเชื่อมของเทอร์มาชีลด์ที่กระแสเชื่อมต่างกัน	183
รูปที่ 9.27 โครงสร้างจุลภาคด้านบน (Face of Weld) ของโลหะเชื่อมที่ใช้เทอร์มาชีลด์ (ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด)	184
รูปที่ 10.1 การแตกร้าวร้อนที่บริเวณโลหะเชื่อม (ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสง)	188
รูปที่ 10.2 แสดงบริเวณที่เสี่ยงต่อการแตกร้าวร้อน	189
รูปที่ 10.3 การแตกร้าวเนื่องจากการให้ความร้อนซ้ำของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS347 ที่บริเวณกระแทกร้อน (ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสง)	189
รูปที่ 10.4 การแตกร้าวเย็นตามขอบแนวเชื่อมที่บริเวณกระแทกร้อน	190
รูปที่ 10.5 ชิ้นงานการทดสอบแบบแผ่นกลม (Circular Patch)	192
รูปที่ 10.6 ชิ้นงานการทดสอบแบบรอยต่อแนวเชื่อมตัววาย (Y-Groove Test)	193
รูปที่ 10.7 ชิ้นงานการทดสอบแบบยึดเค้นลีไฮ (Lehigh Restraint Test)	194
รูปที่ 10.8 ชิ้นงานการทดสอบแบบไม้กางเขน (Cruciform Test)	195
รูปที่ 10.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและระยะทางในการทดสอบแบบพีวีอาร์ (PVR Test)	196
รูปที่ 10.10 ชิ้นงานการทดสอบแบบความเค้นยึดผันแปร (Varestraint Test)	197
รูปที่ 10.11 รูปแบบต่าง ๆ ของการทดสอบแบบความเค้นยึดผันแปร (Varestraint Test)	198
รูปที่ 10.12 (ซ้าย) ระดับความเค้นอ้อมตัว (ขวา) ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงอุณหภูมิการแตกร้าว จากการแข็งตัว (SCTR) กับอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานเชื่อม	199
รูปที่ 10.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวร้อน (Hot Ductility) ของวัสดุกับอุณหภูมิ	200
รูปที่ 10.14 การกระจายของอุณหภูมิกับสมบัติความเหนียวร้อน (Hot Ductility)	201
รูปที่ 10.15 สมบัติความเหนียวร้อน (Hot Ductility) เมื่อเทียบกับบริเวณต่าง ๆ ของการเชื่อม	202

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 การจำแนกประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนและการระบุเกรดตาม AISI/SAE	25
ตารางที่ 1.2 การจำแนกประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนและการระบุเกรดตาม ASTM	26
ตารางที่ 7.1 รหัสอักษรที่ได้จากการคำนวณค่า P_{CM} และปริมาณไฮโดรเจน	125
ตารางที่ 7.2 อุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมจากรหัสอักษร ความหนา และการยึด	127
ตารางที่ 9.1 แสดงปริมาณสารมลทินที่เจือปนอยู่ในโลหะเชื่อม	157
ตารางที่ 9.2 การเรียกชื่อและสัญลักษณ์ของฟลักซ์ในกระบวนการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์	164
ตารางที่ 9.3 ค่าขีดจำกัดน้อยที่สุด (Threshold Limit) ที่ปลอดภัยในการทำงาน	169
ตาราง ก.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน (บางเกรด)	214
ตาราง ก.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน ตามมาตรฐาน AWS A5.1	220
ตาราง ก.3 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ตามมาตรฐาน AWS A5.4	221
ตาราง ก.4 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเหล็กกล้าเจือต่ำ ตามมาตรฐาน AWS A5.5	223
ตาราง ก.5 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ตามมาตรฐาน AWS A5.9	231
ตาราง ก.6 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมอาร์กเหล็กกล้ามีแก๊สปกคลุม ตามมาตรฐาน AWS A5.18	235
ตาราง ก.7 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์เหล็กกล้า ตามมาตรฐาน AWS A5.20	236
ตาราง ก.8 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเหล็กกล้าเจือต่ำแก๊สปกคลุม ตามมาตรฐาน AWS A5.28	237

บทที่ 1 บทนำ (Introduction)

โลหวิทยาการเชื่อม (Welding Metallurgy) เป็นการศึกษาและอธิบายการเปลี่ยนแปลงทางโลหวิทยาที่เกิดขึ้นภายในรอยเชื่อม (Within) และบริเวณรอบรอยเชื่อม (Around) ซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และสมบัติต่าง ๆ (Properties) ของชิ้นงาน รวมถึงความสามารถในการเชื่อม (Weldability) ของวัสดุ ทั้งนี้เนื่องจากการได้รับความร้อนที่เร็วและอัตราการเย็นตัวสูงซึ่งได้รับมาจากกระบวนการเชื่อม ทำให้ปฏิกิริยาทางโลหวิทยาที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นในสภาวะชั่วครู่ (Transient State) ไม่อยู่ในสภาวะสมดุล (Non-equilibrium State) ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมทั้งในรอยเชื่อมและบริเวณต่าง ๆ ที่อยู่รอบแนวเชื่อม เพื่อให้ทราบถึงทั้งสมบัติทางกล (Mechanical Properties) สมบัติทางเคมี (Chemical Properties) และสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Properties) ซึ่งเป็นประโยชน์ในการตรวจสอบและพิจารณาความเหมาะสมของชิ้นงานเชื่อมในการใช้งานตามที่ได้ออกแบบหรือกำหนดไว้

1.1 ปฏิกิริยาทางโลหวิทยา (Metallurgical Reactions)

เนื่องจากวัสดุได้รับความร้อนที่รวดเร็วในระหว่างการเชื่อมและมีอัตราการเย็นตัวที่สูงภายหลังจากแหล่งกำเนิดความร้อนผ่านบริเวณนั้นไป ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโลหวิทยาเกิดขึ้นทั้งในบริเวณดังกล่าวและบริเวณรอบข้าง โดยมีปฏิกิริยาทางโลหวิทยาที่จะเกิดขึ้น เช่น

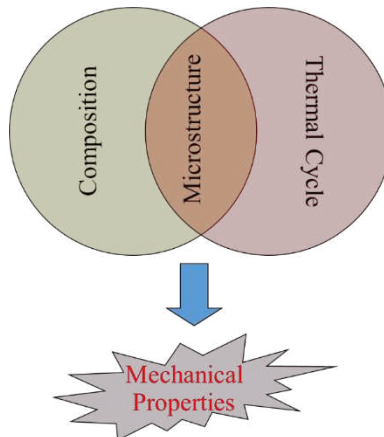
- การเกิดการหลอมเหลว (Melting) และการแข็งตัว (Solidification)
- การเกิดจุดกำเนิด (Nucleation) ของเกรนหรือผลึกที่จะเกิดขึ้นและการเติบโต (Growth)
- การเกิดการแยกตัว (Segregation) และการแพร่ (Diffusion)
- การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) และการเติบโตของเกรน (Grain Growth)
- การเปลี่ยนเฟส (Phase Transformation)
- การตกตะกอน (Precipitation) และการหยาบขึ้น (Coarsening)
- การเกิดของเหลว (Liquation)
- การเปราะ (Embrittlement)

นอกจากปฏิกิริยาทางโลหวิทยาที่จะเกิดขึ้นแล้ว วัสดุที่ได้รับความร้อนจากการเชื่อมยังอาจเกิดเหตุการณ์ทางกลขึ้นได้ด้วย เช่น เกิดความเค้นตกค้าง (Residual Stress) รวมถึงเกิดการบิดตัวของชิ้นงาน (Distortion) ขึ้นได้ในกรณีที่ชิ้นงานสามารถบิดตัวได้ เพื่อเป็นการลดระดับความเค้นตกค้างภายใน ซึ่งส่งผลต่อขนาด (Size) และรูปร่าง (Dimensions) ของชิ้นงาน

สมบัติของวัสดุที่ผ่านการเชื่อม มีความแตกต่างจากวัสดุเดิมก่อนการเชื่อม เนื่องจากวัสดุได้รับความร้อนจากการเชื่อมซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของงานเชื่อมได้ โดยโครงสร้างจุลภาคที่ได้นี้นั้นอยู่

กับส่วนผสมทางเคมี (Chemical Compositions) และประวัติการได้รับความร้อน (Thermal History) ของชิ้นงาน โดยประวัติการได้รับความร้อนดังกล่าวต้องพิจารณาถึงระดับของอุณหภูมิ (Temperature) ที่ได้รับ ระยะเวลาที่ได้รับ ความร้อน ณ อุณหภูมิดังกล่าว (Duration or Time) อัตราการให้ความร้อน (Heating Rate) และรวมถึงอัตราการ เย็นตัว (Cooling Rate) ร่วมด้วยกัน

การพิจารณาเหตุการณ์ดังกล่าว ควรได้รับการพิจารณาเป็นลำดับขั้นตอนการเกิดของเหตุการณ์ โดย ยังคงมีแนวทางในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทางโลหวิทยา (Metallurgical Changes) เช่นเดียวกันกับการ พิจารณาทางโลหวิทยาทั่วไป ทั้งนี้ให้เพิ่มเติมในส่วนของการพิจารณาลำดับการได้รับความร้อน (Heating or Thermal Sequences) ซึ่งรวมถึงแต่การให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) การเชื่อมชิ้นงานทั้งชิ้นเดียว (Singlepass Welding) และการเชื่อมหลายชั้น (Multipass Welding) อัตราการเย็นตัว (Cooling Rate) ของชิ้นงาน จากการเชื่อม ขั้นตอนในการเชื่อม (Welding Sequences) รวมถึงการให้ความร้อนหลังการเชื่อม (Post Weld Heat Treatment: PWHT) และกระบวนการทางกล (Mechanical Processes) ต่าง ๆ หลังการเชื่อมด้วย



รูปที่ 1.1 ผลกระทบของส่วนผสมทางเคมีและประวัติการได้รับความร้อน

จากที่กล่าวมาข้างต้น ส่วนผสมทางเคมีและประวัติการได้รับความร้อนส่งผลสอดคล้องกันต่อการ เกิดโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันออกไป ในบาง กรณีสมบัติทางกลของวัสดุ 2 ประเภทอาจจะไม่แตกต่างกัน เช่น มีความแข็งแรงทางดึง (Tensile Strength) ไม่ แตกต่างกัน แต่โครงสร้างจุลภาคที่ได้อาจจะแตกต่างกันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรอบการออกแบบวัสดุ (Material Design) นั้น ๆ ที่บางวัสดุได้ความแข็งแรงมาจากการเปลี่ยนเฟสของวัสดุ ในขณะที่บางวัสดุได้ความแข็งแรงมาจากการ ตกตะกอน (Precipitation) ซึ่งวัสดุทั้ง 2 กรณีอาจจะมีความแข็งแรงทางดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) และ ความแข็ง (Hardness) ไม่แตกต่างกัน แต่จะมีความทนแรงฟาดกระแทก (Toughness) ที่แตกต่างกันได้ ดังนั้นการ เลือกใช้วัสดุและกระบวนการจัดการกับวัสดุไม่สามารถพิจารณาเพียงแต่สมบัติทางกลเพียงอย่างหนึ่งอย่างใด แต่

ต้องพิจารณาถึงสมบัติทางกลอื่น ๆ รวมทั้งสมบัติทางโลหวิทยา (Metallurgical Properties) ร่วมด้วยกัน จึงจะได้ประโยชน์ในการใช้งานและสามารถใช้งานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ (Intended Uses) ของการออกแบบวัสดุ

1.2 โลหวิทยากายภาพของเหล็กกล้า (Physical Metallurgy of Steel)

เหล็กกล้าประกอบด้วยธาตุเหล็ก (Iron: Fe) เป็นส่วนใหญ่อะไรก็ตามจะมีธาตุอื่น ๆ ประกอบด้วยเพื่อเพิ่มเติมสมบัติด้านต่าง ๆ ของวัสดุ เช่น คาร์บอน (Carbon: C) ช่วยเพิ่มความแข็งแรง ทั้งในแง่สารละลายของแข็ง (Solid Solution) และการเปลี่ยนเฟส หากต้องการศึกษาโลหะวิทยาของเหล็กกล้าแล้ว จำเป็นที่จะต้องศึกษาแผนภูมิเฟสของเหล็กกล้าคาร์บอน (Phase Diagram of Carbon Steel) ซึ่งเป็นแผนภูมิในสภาวะสมดุลระหว่างเหล็กและคาร์ไบด์ ($\text{Fe-Fe}_3\text{C}$) ที่อธิบายถึงการเกิดเฟสของวัสดุที่อุณหภูมิและส่วนผสมต่าง ๆ ของคาร์บอนในเหล็กนั่นเอง ในสภาวะสมดุล (Equilibrium State) เฟสที่สามารถเกิดขึ้นได้ในเหล็กกล้าคาร์บอนทั้งอุณหภูมิสูง (Elevated Temperature) และอุณหภูมิห้อง (Room Temperature) ได้แก่

- เฟอร์ไรต์ (Ferrite) โดยหากปรากฏที่อุณหภูมิต่ำจะเรียกว่า แอลฟาเฟอร์ไรต์ (α -Ferrite) และหากปรากฏที่อุณหภูมิสูงจะเรียกว่า เดลต้าเฟอร์ไรต์ (δ -Ferrite)
- เพอร์ไลต์ (Pearlite) ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างเฟอร์ไรต์กับคาร์ไบด์ที่เรียกว่า ซีเมนไทต์ (Cementite: Fe_3C)
- ออสเตไนต์ (Austenite) เป็นเฟสที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิยูเทกตอยด์ (Eutectoid Temperature) ซึ่งเกิดขึ้นก่อนที่จะเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอร์ไรต์หรือเพอร์ไลต์นั่นเอง โดยจุดยูเทกตอยด์เป็นจุดที่มีอุณหภูมิและส่วนผสมทางเคมีเหมาะสมสำหรับวัสดุในการเปลี่ยนเฟสจากของแข็ง 1 เฟส ไปเป็นของแข็ง 2 เฟส ในที่นี้ คือ การเปลี่ยนจากออสเตไนต์ไปเป็นเพอร์ไลต์ ซึ่งประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และซีเมนไทต์นั่นเอง

นอกจากนี้ยังมีโอกาสเกิดเฟสอื่นซึ่งไม่อยู่ในสภาวะสมดุล (Non-equilibrium State) ที่อุณหภูมิห้องได้ด้วยเช่นเดียวกัน อันเป็นผลมาจากอัตราการเย็นตัวที่เร็ว (Rapid Cooling) ร่วมกับการใส่ธาตุอัลลอย (Alloying Elements) ต่าง ๆ เข้าไปทำให้เพิ่มความสามารถในการทำให้แข็ง (Hardenability) ได้เฟสเหล่านี้ได้แก่

- มาร์เทนไซต์ (Martensite) เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจากเฟสออสเตไนต์มีความแข็งแรง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength) สูง แต่มีความเปราะ (Brittle) แดกร้าวง่าย จำเป็นต้องทำการอบคืนตัว (Tempering) เพื่อเพิ่มความทนแรงฟาดกระแทกให้แดกร้าวได้ยากขึ้น โดยความแข็งแรงยังคงไม่แตกต่างจากเดิมมากนัก
- เบไนต์ (Bainite) เป็นอีกเฟสหนึ่งที่ไม่สมดุลย์เช่นกัน อย่างไรก็ตามเฟสนี้จะเกิดในกรณีที่อัตราการเย็นตัวไม่เร็วพอหรือความสามารถในการชุบแข็งไม่ดีพอ โดยเฟสนี้มีความแข็งแรงต่ำกว่ามาร์เทนไซต์ แต่มีความทนแรงฟาดกระแทกสูงกว่า

1.3 แผนภูมิเฟสของเหล็กกล้าคาร์บอน (Phase Diagram of Carbon Steel)

แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนแสดงให้เห็นถึงเฟสที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิและส่วนผสมของคาร์บอน แกนนอนเป็นส่วนผสมของคาร์บอนตั้งแต่ส่วนผสมที่เป็นเหล็กกล้า (Steel) ที่ราว 2.11%C หรือ 2.08%C ไปจนถึงส่วนผสมที่เป็นเหล็กหล่อ (Cast Iron) และสูงสุดที่ประมาณ (6.67%C) แกนตั้งเป็นแกนบอกอุณหภูมิที่พิจารณา แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 1.2

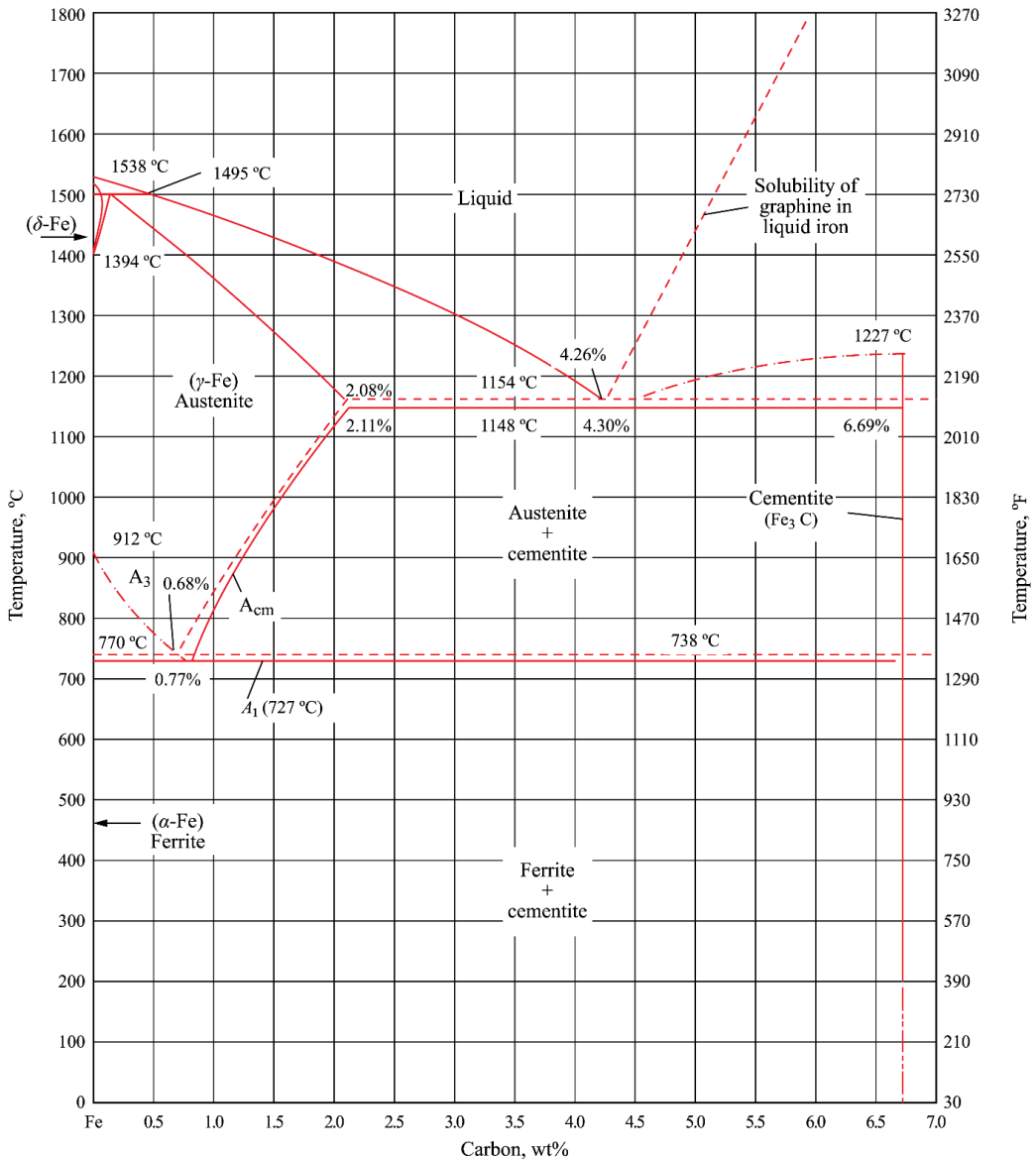
ปฏิกิริยาทางโลหวิทยาที่เกิดขึ้นประกอบด้วย

- ปฏิกิริยายูเทกติก (Eutectic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากของเหลว 1 ชนิดเปลี่ยนเป็นของแข็ง 2 ชนิด ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเน้นสำหรับส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อ โดยเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 1148°C ที่คาร์บอนประมาณ 4.3%
- ปฏิกิริยายูเทกตอยด์ (Eutectoid Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากของแข็ง 1 ชนิด (ในที่นี้ คือ ออสเตไนต์) เปลี่ยนเป็นของแข็ง 2 ชนิด (ในที่นี้ คือ เฟอร์ไรต์ซึ่งประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และซีเมนไทต์) โดยเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 727°C ที่คาร์บอนประมาณ 0.77% โดยเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป
- ปฏิกิริยาเพอริเทกติก (Peritectic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงและเกิดในช่วงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเท่านั้น เป็นปฏิกิริยาที่มีความซับซ้อนมาก สำหรับในเหล็กกล้าคาร์บอนจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิสั้น ๆ ส่งผลให้เหล็กกล้าคาร์บอนมีความเสี่ยงต่อการแตกร้าวร้อน (Hot Cracking) ต่ำกว่ากรณีของปฏิกิริยายูเทกติก

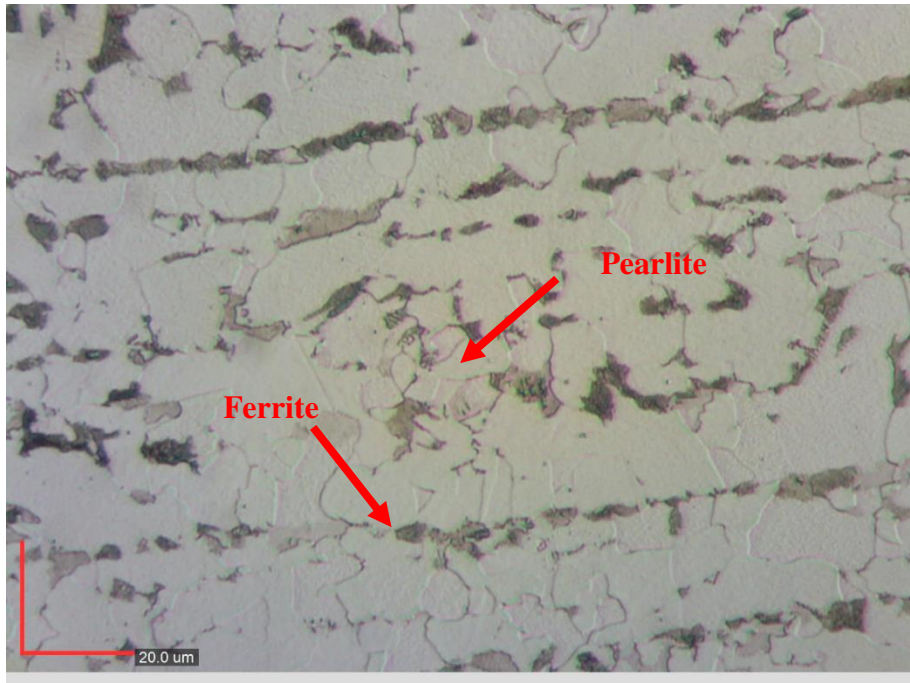
หากแบ่งกลุ่มของเหล็กกล้าคาร์บอนตามปริมาณคาร์บอนแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีคาร์บอนสูงกว่าจุดยูเทกตอยด์ (Hypereutectoid) และกลุ่มที่มีคาร์บอนต่ำกว่าจุดยูเทกตอยด์ (Hypoeutectoid) โดยกลุ่มที่มีคาร์บอนต่ำกว่าจุดยูเทกตอยด์เรียกว่า เหล็กกล้าไฮโปยูเทกตอยด์ (Hypoeutectoid Steels) มีโครงสร้างจุลภาค ณ อุณหภูมิห้อง ในกรณีที่เย็นตัวแบบสมดุล ประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และเฟอร์ไรต์ ดังรูปที่ 1.3 เมื่อเหล็กกล้าคาร์บอนมีส่วนผสมอยู่ในกลุ่มดังกล่าวเย็นตัวลงมาจากอุณหภูมิที่เป็นออสเตไนต์จะเริ่มเปลี่ยนเฟสกลายเป็นเฟอร์ไรต์ก่อนในบางส่วน โดยเริ่มจากรอยต่อเกรนของออสเตไนต์และเมื่อเย็นตัวลงมาเรื่อย ๆ ปริมาณของเฟอร์ไรต์จะเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณของออสเตไนต์จะลดลง จนกระทั่งถึงอุณหภูมิยูเทกตอยด์หรือจุดยูเทกตอยด์คือออสเตไนต์ที่เหลืออยู่จะเฟสกลายเป็นเฟอร์ไรต์ตามปฏิกิริยายูเทกตอยด์ ดังนั้นปริมาณของเฟอร์ไรต์ในโครงสร้างจุลภาคจะขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในส่วนผสมทางเคมี ปริมาณคาร์บอนมากส่งผลให้มีโครงสร้างจุลภาคของเฟอร์ไรต์มากตามไปด้วย ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากกฎของคานังจด์ (Tie Line) ที่ใช้ในการหาสัดส่วนของเฟสจากแผนภูมิเฟส

เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าจุดยูเทกตอยด์เรียกว่า เหล็กกล้าไฮเพอร์ยูเทกตอยด์ (Hypereutectoid Steels) มีโครงสร้างจุลภาค ณ อุณหภูมิห้อง ในกรณีที่เย็นตัวแบบสมดุลประกอบด้วยซีเมนไทต์และเฟอร์ไรต์ ดังรูปที่ 1.4 เมื่อเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีส่วนผสมทางเคมีอยู่ในกลุ่มดังกล่าว เริ่มเย็นตัวลงมาจาก

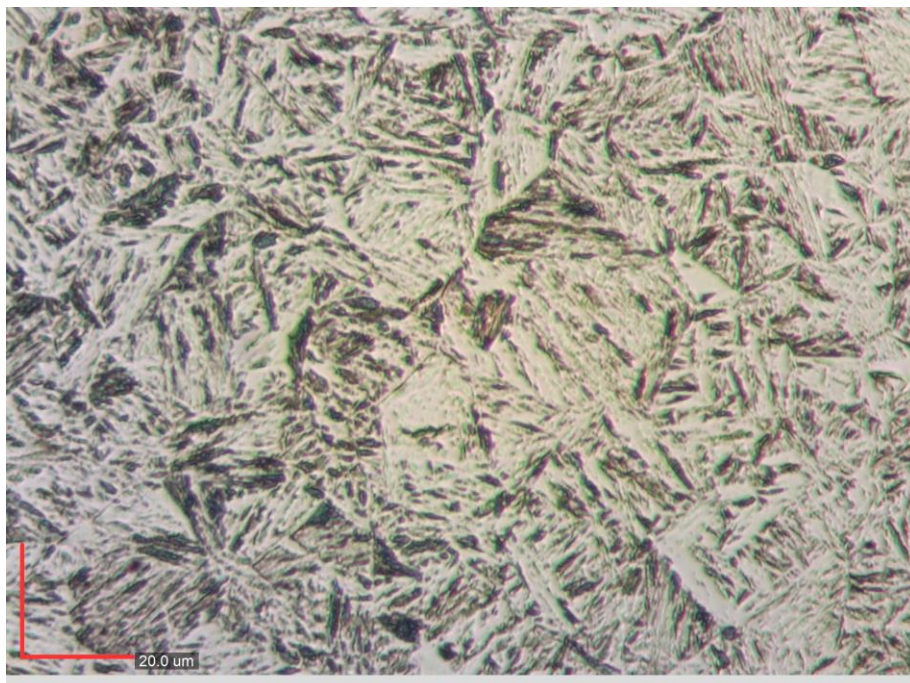
อุณหภูมิที่เป็นออสเตไนต์จะเริ่มเปลี่ยนเฟสกลายเป็นซีเมนไทต์ร่วมกับออสเตไนต์ และเมื่ออุณหภูมิถึงจุดยูเทกตอยด์ออสเตไนต์ที่เหลือจะเปลี่ยนเฟสกลายเป็นเฟอร์ไรต์ตามปฏิกิริยายูเทกตอยด์ สัดส่วนปริมาณเฟสที่เกิดขึ้นจะสามารถคำนวณหาได้จากกฎของ “Tie Line” ในลักษณะเดียวกันกับเหล็กกล้าไฮโปยูเทกตอยด์



รูปที่ 1.2 แผนภูมิเฟสของเหล็กกล้าคาร์บอน (Fe-Fe₃C Phase Diagram) (ปรับจาก ASM Handbook Vol. 4 [1])

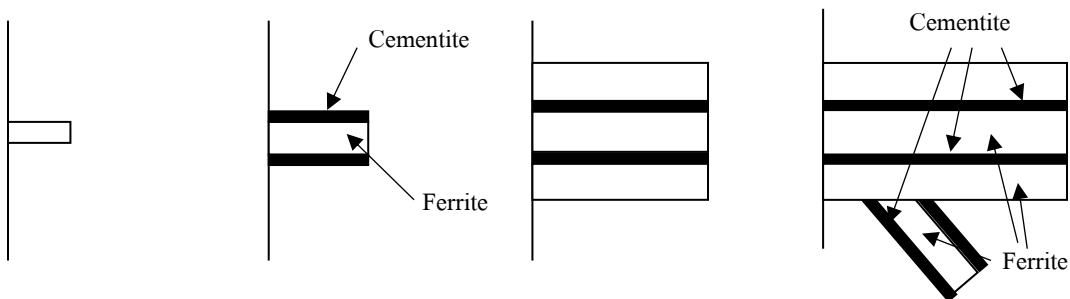


รูปที่ 1.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไฮโปยูเทกตอยด์ (Hypoeutectoid Steel) (โดย อิศรทัต WELLab at MTC)



รูปที่ 1.4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไฮเพอร์ยูเทกตอยด์ (Hypereutectoid Steel) (โดย อิศรทัต WELLab at MTC)

การเกิดเฟสของเพอร์ไลต์จากออสเตไนต์เป็นการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีภายในวัสดุผ่านการแพร่ (Diffusion) ของคาร์บอน เพอร์ไรต์ต้องการคาร์บอนในปริมาณที่ต่ำมาก (ราว 0.02% C) เมื่อเทียบกับซีเมนไทต์ (ราว 6.67% C) ดังนั้นการเกิดโครงสร้างจุลภาคของเพอร์ไลต์สามารถเขียนเป็นภาพร่างแสดงการเปลี่ยนแปลงได้ดังรูปที่ 1.5 โดยอาจเริ่มจากการเกิดเพอร์ไรต์ขึ้นมาก่อน ซึ่งจะเป็นการผลักดันให้คาร์บอนออกจากเพอร์ไรต์ทั้งสองด้าน คาร์บอนดังกล่าวจะเป็นองค์ประกอบของการเกิดซีเมนไทต์ประกบคู่ทั้งสองด้านของเพอร์ไรต์ ในขณะที่ซีเมนไทต์ที่เกิดขึ้นก็จะดึงเอาคาร์บอนจากบริเวณรอบ ๆ ข้างมาใช้ในการเติบโต ทำให้บริเวณรอบข้างขาดคาร์บอน ซึ่งเป็นปัจจัยส่งเสริมให้เกิดเพอร์ไรต์ขึ้น เหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นสลับกันซ้ำไปซ้ำมา จึงกลายเป็นโครงสร้างจุลภาคเพอร์ไลต์ที่มีการเรียงสลับกันระหว่างเพอร์ไรต์และซีเมนไทต์นั่นเอง



รูปที่ 1.5 ภาพจำลองการเกิดโครงสร้างเพอร์ไลต์

1.4 แผนภูมิการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal Transformation Diagram)

เป็นแผนภูมิที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุ ณ อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงคงที่ (Isothermal Temperature) ดังแสดงในรูปที่ 1.6 สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน การเปลี่ยนเฟสในสถานะของแข็ง (Solid State Phase Transformation) จากเฟสออสเตไนต์จะเริ่มต้นที่เส้นทางด้านซ้ายมือ (Starting of Reaction) ณ อุณหภูมิที่พิจารณาใด ๆ ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวคงที่ตลอดการเปลี่ยนแปลงเฟส จนกระทั่งการเปลี่ยนเฟสเสร็จสิ้นสมบูรณ์เมื่อระยะเวลาดำเนินไปถึงเส้นทางด้านขวามือ (Ending of Reaction) ในกรณีที่อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงคงที่ จะได้โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นเป็นชุดเดียว อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วจะไม่เกิดเหตุการณ์ที่อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงคงที่ ซึ่งจะทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่ผสมกัน เช่น เพอร์ไลต์ผสมกับเบไนต์ เป็นต้น

แผนภูมินี้ถูกใช้ประโยชน์ในการทำนายถึงผลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการเย็นตัวซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน เช่น ความแข็ง ความแข็งแรง ทำให้สามารถทำนายได้ว่าความแข็งของวัสดุจะเป็นเช่นไร อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์ในบางกรณีก็จะใช้เพื่อป้องกันการเกิดเฟสบางอย่างที่ไม่พึงประสงค์ในบางกรณี เช่น มาร์เทนไซต์ ซึ่งหากไม่ต้องการให้เกิดเฟสดังกล่าว จำเป็นต้องให้วัสดุชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวที่ต่ำ และให้ผ่านเส้นการเปลี่ยนเฟสจากทางซ้ายมือไปทางด้านขวามืออย่างช้า ๆ ทั้งนี้หากอัตราการเย็นตัวสูงขึ้นไปอีก การเปลี่ยนแปลงไม่ผ่านเส้นใด ๆ เลยและไม่มีการเปลี่ยนเป็นเฟสสมดุล ส่งผลให้เกิดเป็นโครงสร้างจุลภาคของมาร์เทนไซต์แทน