

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กกล้าไร้สนิม [2]

เหล็กกล้าไร้สนิมหรือเหล็กสแตนเลสเป็นเหล็กกล้าผสมสูงที่มีปริมาณโครเมียมอย่างน้อย 11% โดยมีหรือไม่มีการเติมธาตุผสมตัวอื่นๆลงไปก็ได้ ความสามารถด้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแผ่นฟิล์มออกไซด์บางๆบนผิวหน้าของเหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิมถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มปกติทั่วไปและกลุ่มพิเศษ สำหรับกลุ่มปกติมีด้วยกัน 3 ชนิดคือ ชนิดออสเทนนิติก ชนิดเฟอร์ริติกและชนิดมาร์เทนซิติก ส่วนกลุ่มพิเศษมีอยู่ 4 ชนิด ประกอบด้วย ชนิดดูเพล็กซ์ ชนิดซูเปอร์ออสเทนนิติก ชนิดซูเปอร์เฟอร์ริติก และชนิดชุบแข็งด้วยกรรมวิธีตกผลึก

ธาตุผสมหลักที่มีผลต่อลักษณะทางโลหะวิทยาคือโครเมียม นิกเกิล และคาร์บอน ส่วนธาตุผสมตัวอื่นๆ อย่างเช่น โมลิบดีนัม ไนโอเบียม ไททาเนียม แมงกานีส ไนโตรเจน และทองแดง จะเป็นธาตุที่คอยสนับสนุนลักษณะทางโลหะวิทยาของเหล็กกล้าไร้สนิม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มปกติถูกแบ่งและกำหนดหน้าที่ตามส่วนผสมทางเคมี ตารางที่ 2.1 แสดงการจำแนกเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มปกติโดย American Iron and Steel Institute (AISI)

เหล็กกล้าไร้สนิมมีสมบัติด้านทานการกัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงที่เป็นเลิศ รวมทั้งการมีสมบัติทางกลดีเยี่ยมเมื่ออยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง จากข้อดีเหล่านี้ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมถูกนำไปใช้งานในรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป เช่น อุปกรณ์ในครัวเรือน, เครื่องจักรกลในงานอุตสาหกรรม วัสดุก่อสร้าง และรวมไปถึงชิ้นส่วนยานยนต์

ตารางที่ 2.1 การจำแนกเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มปกติ [2]

การจำแนกชนิดตาม AISI	ชนิดของธาตุผสม	โครงสร้างทางโลหะวิทยา
2XX	โครเมียม-นิกเกิล-แมงกานีส	ออสเทนนิติก
3XX	โครเมียม-นิกเกิล	ออสเทนนิติก
4XX	โครเมียม	มาร์เทนซิติกและเฟอร์ริติก

สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มปกติเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าคาร์บอนถูกแสดงในตารางที่ 2.2 สมบัติด้านการขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion), การนำความร้อน (Thermal

conductivity) และความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity) มีผลกระทบที่สำคัญต่อความสามารถด้านการเชื่อมของเหล็กไร้สนิม

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าคาร์บอนเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มปกติ [2]

สมบัติ \ ชนิดเหล็ก	เหล็กกล้าคาร์บอน	ตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิม		
		ออสเทนนิติก (ชนิด 304)	เฟอร์ริติก (ชนิด 430)	มาร์เทนซิติก (ชนิด 410)
ความถ่วงจำเพาะ	7.86	7.93	7.70	7.75
ความต้านทานไฟฟ้า ($\mu \Omega \cdot \text{cm}$)	15	72	60	57
ความเป็นแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง	ดูดติด	ไม่ดูด	ดูดติด	ดูดติด
ความร้อนจำเพาะที่ 0-100°C ($\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$)	0.12	0.12	0.11	0.11
สัมประสิทธิ์การขยายตัวแบบ Linear ที่ 0-100°C ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	11.4	17.3	10.4	9.9
การนำความร้อนที่ 100°C ($10^{-2} \text{ cal/cm/sec}^\circ\text{C}$)	11.2	3.89	6.24	5.95

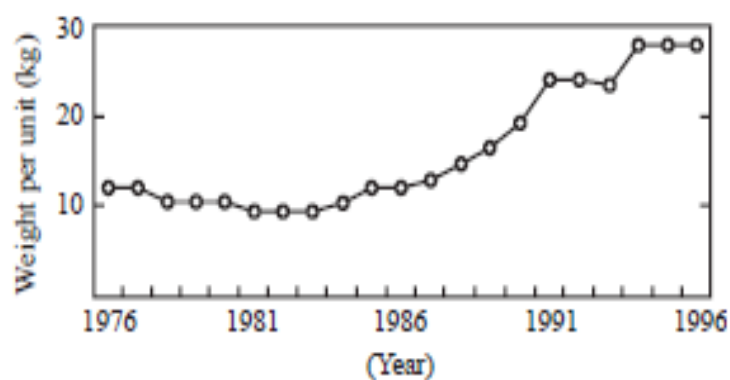
ตัวอย่างส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 และ 304L แสดงในตารางที่ 2.3 เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกมีระบบพื้นฐานในระบบสามเฟสของ Fe-Cr-Ni โดยปกติเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มักมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด (Fully austenite) แม้ว่าจะมีเฟอร์ไรต์ที่อุณหภูมิสูงหรือเดลต้าเฟอร์ไรต์ (Delta ferrite) เกิดขึ้นในโครงสร้างบ้างก็ตาม การเติมธาตุไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมจะแสดงด้วยสัญลักษณ์ N โดยไนโตรเจนจะไปเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เหล็กและเป็นตัวเพิ่มเสถียรภาพให้แก่โครงสร้างออสเทนไนต์ ในส่วนของปริมาณคาร์บอนที่สูงขึ้นในเหล็กกล้าไร้สนิมบางชนิดจะแทนด้วยสัญลักษณ์ H โดยธาตุคาร์บอนจะถูกควบคุมให้อยู่ระหว่างค่าที่กำหนดสำหรับความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ส่วนกรณีที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำจะถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ L เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกมีการใช้งานประมาณ 2 ใน 3 ของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งหมด เนื่องจากให้ลักษณะการขึ้นรูปที่สูงและมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 และ 304L (% โดยน้ำหนัก) [2]

ชนิด	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	อื่นๆ
AISI 304	≤ 0.08	≤ 2.00	≤ 1.00	18.0 – 20.0	8.0 – 10.5	≤ 0.045	≤ 0.03	–
AISI 304L	≤ 0.03	≤ 2.00	≤ 1.00	18.0 – 20.0	8.0 – 12.0	≤ 0.045	≤ 0.03	–

2.2 การใช้เหล็กกล้าไร้สนิมกับระบบท่อไอเสียรถยนต์

เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุที่ดีเยี่ยมสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมยานยนต์เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ ส่วนมากนิยมใช้เหล็กกล้าไร้สนิมในกลุ่มออสเทนนิติก และเฟอร์ริติก มีการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมกับรถยนต์โดยเฉลี่ยประมาณ 20 ถึง 30 กิโลกรัมต่อคัน [1] การนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาใช้งานในอุตสาหกรรมยานยนต์ถูกแสดงในรูปที่ 2.1 ส่วนใหญ่จะใช้ในระบบท่อไอเสีย โดยมีระดับอุณหภูมิการใช้งานเป็นหนึ่งในการจำแนกการใช้งานตามชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมตามที่แสดงในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.1 การเก็บข้อมูลในการใช้งานที่เพิ่มขึ้นของเหล็กกล้าไร้สนิมต่อรถหนึ่งคัน [1]

ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบของระบบท่อไอเสียและวัสดุที่ใช้งาน [1]

บริเวณ	(1) ท่อไอเสียรวม	(2) ท่อส่วนหน้า	(3) ท่ออ่อน	(4) เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา		(5) ท่อส่วนกลาง	(6) มัลติเพลอร์หลัก	(7) ท่อส่วนปลาย
				ผนังชิ้นงานด้านนอก	ตัวนำปฏิกิริยา			
อุณหภูมิใช้งาน	750 – 950°C	600 – 800°C			1,000 – 1,200°C	400 – 600°C	100 – 400°C	
วัสดุที่ใช้	SUH 409L SUS 430J1L SUS429 SUS 444 SUS XM15J1	SUS 304 SUSX15J1	SUS409L SUS436J1L	SUH21	SUH409L	SUH409L	SUH409L SUS436	

การเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละชนิดในระบบท่อไอเสียรถยนต์มีการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน ตามอุณหภูมิที่ชิ้นงานได้รับ คือ ชิ้นส่วนร้อนและชิ้นส่วนเย็นซึ่งทั้ง 2 ส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1. ชิ้นส่วนร้อน-อุณหภูมิสูง (Hot End) หมายถึง ส่วนที่ออกจากเครื่องยนต์สิ้นสุดที่เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย ท่อไอเสียรวม ท่อส่วนหน้า เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ชิ้นส่วนเหล่านี้ต้องต้านทานความคืบ (Creep resistance) ที่อุณหภูมิสูง และต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันได้ดี

2. ชิ้นส่วนเย็น-อุณหภูมิต่ำ (Cold End) หมายถึง ส่วนของท่อไอเสียหลังจากเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยาจนถึงปลายท่อ เช่น มัลติเพลอร์และส่วนปลายท่อ ชิ้นส่วนเหล่านี้ใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก สามารถทนความร้อนและต้านทานการกัดกร่อนได้ และยังสามารถตกแต่งให้สวยงามได้ด้วย

2.2.1 อุตสาหกรรมการเชื่อมประกอบท่อไอเสียยานยนต์

อย่างไรก็ดีในกระบวนการประกอบท่อไอเสีย การเชื่อมจัดเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญเนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้มีความหนาอยู่ในช่วง 0.1 – 2.0 มิลลิเมตร [3] จึงต้องมีการกำหนดสภาวะการทำงานที่เหมาะสม สำหรับกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมหรือ GMAW ของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยทั่วไปจะใช้แก๊สผสม Ar + 1-2%O₂, Ar + 2.5%CO₂ หรือ 90%He + 7.5%Ar + 2.5%CO₂ ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะที่ต้องการ หากแต่ในปัจจุบันมีกลุ่มผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์บางกลุ่ม ได้มีการปรับใช้

แก๊สผสมชนิดอื่นๆ นอกเหนือจากแก๊สผสมข้างต้น จากการที่ผู้เขียนและทีมงานได้มีโอกาสสำรวจตลาดอุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนท่อไอเสียเพื่อส่งมอบให้กับบริษัทผู้ผลิตในกลุ่มยานยนต์ต่างๆ พบข้อมูลที่น่าสนใจซึ่งเกี่ยวข้องกับการใช้แก๊สปกคลุมในงานเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมตามตารางที่ 2.5 ทั้งนี้เหตุผลหลักที่ได้รับจากผู้เกี่ยวข้องในอุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนท่อไอเสียกรณีที่เลือกใช้แก๊สปกคลุมแตกต่างจากมาตรฐานทั่วไป คือ การลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตให้น้อยลง อย่างไรก็ตามการปรับเปลี่ยนชนิดของแก๊สปกคลุมย่อมมีผลกระทบต่อสมบัติของรอยเชื่อมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อาจส่งผลให้สมบัติบางอย่างของรอยเชื่อมด้อยลง เช่น ความต้านทานการกัดกร่อน ปริมาณเพอร์ไรต์ในรอยเชื่อม ความต้านทานการแตกร้าวร้อน หรือการส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างรอยเชื่อม เป็นต้น

ตารางที่ 2.5 การใช้แก๊สปกคลุมรอยเชื่อมสำหรับกระบวนการ GMAW ในอุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนท่อไอเสียยานยนต์ที่ได้จากการสำรวจในจังหวัดกรุงเทพฯ ชลบุรี อยุธยาและระยอง

บริษัท	ชนิดลวดเชื่อมที่ใช้	ขนาดลวด (มม.)	สัดส่วนแก๊สปกคลุมที่ใช้	วิธีการเชื่อม
A	ER308LSi	1.2	75%Ar – 15%CO ₂	Robotic และ manual
B	ER308LSi	0.9 และ 1.0	80%Ar – 20%CO ₂	Robotic
C	ER308	1.2	80%Ar – 20%CO ₂	Automatic
D	ER308 และ ER308LSi	0.9 และ 1.2	96.5%Ar – 3.5%O ₂	Robotic และ manual
E	ER308LSi	1.2	98%Ar – 2%O ₂	Robotic และ manual
F	ER308LSi	1.0	80%Ar – 20%CO ₂	Robotic และ manual
G	ER308LSi	0.8 และ 1.2	80%Ar – 20%CO ₂	Robotic และ automatic
H	ER308LSi	0.9 และ 1.0	80%Ar – 20%CO ₂	Automatic
I	ER308LSi	0.8, 0.9, 1.2	70%Ar – 30%CO ₂	Automatic
J	ER308LSi	0.8	65%Ar – 35%CO ₂	Automatic

หมายเหตุ จากข้อมูลการสำรวจปี พ.ศ.2554 โดยฝ่ายลูกค้าสัมพันธ์ บริษัทไทย-โกเบ เวกดิง จำกัด

2.3 ลักษณะทางโลหะวิทยาของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนและออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงกว่า 649°C ได้ดี รวมทั้งยังมีความเหนียวที่ดีเยี่ยมในช่วงอุณหภูมิสูง สำหรับความต้านทานต่อการกัดกร่อนและออกซิเดชันจะมีสมบัติที่ดีเมื่อมีปริมาณโครเมียมสูง ซึ่งโดยทั่วไปจะมากกว่า 16% โดยน้ำหนัก การเพิ่มธาตุที่มีเสถียรภาพต่อโครงสร้างออสเทนไนต์ส่วนใหญ่ได้แก่ คาร์บอนและนิเกิล และบางครั้งก็มีไนโตรเจน จะช่วยสนับสนุนให้ออสเทนไนต์คงอยู่ได้ในช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่กว้างจากอุณหภูมิห้องจนถึงช่วงอุณหภูมิลดลง

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกบางชนิดมีการเพิ่มธาตุผสมตัวอื่นๆลงไปด้วย เช่น แมงกานีส, ซิลิกอน, โมลิบดีนัม, ไนโอเบียม, ไททาเนียมและไนโตรเจน สำหรับแมงกานีสจะมีประสิทธิภาพในการจับตัวกับกำมะถัน เพื่อรวมตัวเป็นแมงกานีสซัลไฟด์ที่เสถียร นอกจากนี้แมงกานีสจะไปเพิ่มความสามารถด้านการละลายตัวของไนโตรเจนซึ่งมีผลต่อการช่วยให้ออสเทนไนต์มีเสถียรภาพ ส่วนซิลิกอนจะถูกเติมลงไปเพื่อจุดประสงค์ด้านการกำจัดออกซิเจนเมื่อเติมถึง 1% โดยน้ำหนัก ระดับซิลิกอนที่มากกว่านี้จะมีประสิทธิภาพในการช่วยปรับปรุงออกซิเดชันและความต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ซิลิกอนยังไปเพิ่มการหลอมเหลวของโลหะหลอมเหลว ซึ่งมีส่วนสำคัญสำหรับการเชื่อมและการหล่อ อย่างไรก็ตามซิลิกอนในรอยเชื่อมที่มีเฟอร์ไรต์ต่ำมากๆ หรือไม่มีเฟอร์ไรต์เลย จะทำให้เกิดการแตกร้าวร้อนขึ้นได้ สำหรับโมลิบดีนัมซึ่งเป็นธาตุที่ทำให้เกิดการก่อตัวของเฟอร์ไรต์จะถูกเติมลงไปเพื่อปรับปรุงความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบหลุม และเพิ่มความแข็งแรงในสารละลายของของแข็งด้วย สำหรับไนโอเบียมและไททาเนียมจะเป็นพวกธาตุที่ทำให้เกิดคาร์ไบด์เป็นธาตุที่สนับสนุนให้เกิดเฟอร์ไรต์ และเติมลงไปเพื่อปรับปรุงความต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน ส่วนไนโตรเจนเป็นธาตุที่สนับสนุนให้เกิดออสเทนไนต์ โดยจะเพิ่มทั้งความแข็งแรงและความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม เมื่อเติมลงไปที่ระดับความเข้มข้นในช่วง 0.1 – 0.2% โดยน้ำหนัก ตารางที่ 2.6 แสดงผลของธาตุผสมต่างๆในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ตารางที่ 2.6 ผลของธาตุผสมต่างๆในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก [2]

ธาตุ	ชนิดของเหล็ก	ผลกระทบ
คาร์บอน	ทุกชนิด	เป็นธาตุที่ทำให้เกิดการก่อตัวของออสเทนไนต์อย่างรุนแรง สามารถรวมกับโครเมียมให้คาร์ไบด์ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน
โครเมียม	ทุกชนิด	สนับสนุนให้เกิดเฟอร์ไรต์ เพิ่มความต้านทานต่อออกซิเดชันและการกัดกร่อน
นิกเกิล	ทุกชนิด	สนับสนุนให้เกิดออสเทนไนต์ เพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ความต้านทานการกัดกร่อน และความเหนียว
ไนโตรเจน	XXXN	เป็นตัวที่ก่อให้เกิดออสเทนไนต์อย่างรุนแรงเหมือนกับคาร์บอน ไนโตรเจนมีผลในการก่อตัวของออสเทนไนต์เมื่อเทียบกับนิกเกิลแล้วถือว่ามีค่าสูงกว่าหลายเท่า นอกจากนี้ยังเพิ่มความแข็งแรงโดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบหลุม
ไนโอเบียม	347	เติมเข้าไปเพื่อให้จับตัวกับคาร์บอนเพื่อลดความไวต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน มีผลทำให้เกรนละเอียดขึ้น สนับสนุนให้เกิดการก่อตัวของเฟอร์ไรต์ ปรับปรุงความแข็งแรงความถี่ แต่จะลดความเหนียว
แมงกานีส	2XX	ทำให้ออสเทนไนต์มีเสถียรภาพที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง แต่จะให้เฟอร์ไรต์ที่อุณหภูมิสูง มีพฤติกรรมการแตกร่อนเมื่อเกิดการรวมตัวเป็นแมงกานีสซัลไฟด์
โมลิบดีนัม	316 และ 317	ปรับปรุงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อน และสนับสนุนให้เกิดการก่อตัวของเฟอร์ไรต์
เซเลเนียม หรือ กำมะถัน	303 และ 303Se	เพิ่มความสามารถด้านการกลึงไส แต่จะสนับสนุนให้เกิดการแตกร้าวร่อนในระหว่างการเชื่อม มีความต้านทานการกัดกร่อนค่อนข้างต่ำ เพิ่มการซึมลึกของรอยเชื่อมในการเชื่อมทิก

ตารางที่ 2.6 ผลของธาตุผสมต่างๆในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (ต่อ) [2]

ซิลิกอน	203B	เพิ่มความต้านทานต่อการตกสะเก็ดที่ผิว สนับสนุนให้เกิดการก่อตัวของเฟอร์ไรต์และเฟสซิกมาเมื่อมีปริมาณมากกว่า 1% มีการเติมลงในเหล็กกล้าไร้สนิมทุกชนิดเพียงเล็กน้อย เพื่อจุดประสงค์ด้านการกำจัดออกซิเจน เพิ่มการไหลตัวและการเป็ยตัวของรอยเชื่อมกับชิ้นงาน
ไททาเนียม	321	เติมลงไปเพื่อให้จับตัวกับคาร์บอนเพื่อลดความไวต่อการเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน มีผลทำให้เกรนละเอียดขึ้น สนับสนุนให้เกิดการก่อตัวของเฟอร์ไรต์ และปรับปรุงความแข็งแรงความคืบ
ทองแดง	CN – 7M	ปกติแล้วเติมลงไปนในเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน ลดความไวต่อการเกิด SCC และให้ผลด้าน Age – hardening

2.4 กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม [2]

กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจะใช้แก๊สเฉื่อยทำหน้าที่ปกคลุมรอยเชื่อมอย่างพอเหมาะ การเชื่อมจะมีการสูญเสียธาตุผสมในระหว่างการถ่ายโอนจากลวดเติมสู่การอาร์คที่น้อยมากๆ เมื่อใช้อาร์กอนเป็นแก๊สปกคลุมจะสามารถให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนที่สูงกว่า 95% ปกติแล้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมที่ใช้จะอยู่ในช่วง 0.8– 1.6 มิลลิเมตร

กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมเหล็กกล้าไร้สนิมนิยมใช้กระแสไฟตรงขั้วบวก และมีแก๊สผสมอาร์กอนเป็นแก๊สปกคลุมหลัก เช่น 98%Ar – 2%O₂ การถ่ายโอนน้ำโลหะจากปลายลวดเชื่อมสู่ชิ้นงานจะเกิดในลักษณะการถ่ายโอนแบบเม็ดละเอียด (Spray transfer) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแสที่ใช้ นอกจากนี้ น้ำโลหะสามารถเกิดการถ่ายโอนในลักษณะลัดวงจรหรือ GMAW-S และการถ่ายโอนแบบเม็ดละเอียดพัลส์หรือ GMAW-P ความหลากหลายในกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมนี้ส่งผลให้สามารถใช้กระแสไฟเชื่อมที่ต่ำและแรงดันอาร์คอยู่ระหว่าง 18 – 24 โวลต์ได้ ทำให้สามารถขยายช่วงการใช้งานของกระบวนการเชื่อมนี้กับชิ้นงานที่มีความหนาต่ำถึง 0.254 มิลลิเมตร โดยรอยเชื่อมจะเกิดการบิดตัวที่น้อยเนื่องจากค่าความร้อนเข้า (Heat input) มีค่าต่ำกว่าการถ่ายโอนแบบเม็ดละเอียดปกติ นอกจากนี้การเชื่อมด้วยวิธีถ่ายโอนแบบลัดวงจรควรทำอย่างระมัดระวังเพื่อลดปัญหาการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Lack of fusion) ที่จะเกิดขึ้น เมื่อทำการเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนากว่าการเชื่อมในกลุ่มโลหะแผ่นบาง

2.4.1 ลวดเชื่อมเปลือยสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

มาตรฐานลวดเชื่อมเปลือยสำหรับกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกชนิด 304 ถูกแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเปลือยชนิด ER308 และ ER304LSi (%โดยน้ำหนัก) [4]

ชนิด	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Cu
308	≤ 0.08	1.0 – 2.5	0.30 – 0.65	19.5 – 22.0	9.0 – 11.0	≤ 0.75	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.75
308LSi	≤ 0.03	1.0 – 2.5	0.65 – 1.00	19.5 – 22.0	9.0 – 11.0	≤ 0.75	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.75

2.4.2 การเลือกแก๊สปกคลุมรอยเชื่อมในกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม [5]

2.4.2.1 แก๊สผสมอาร์กอนกับออกซิเจน การเติมปริมาณแก๊สออกซิเจนเข้าไปเพียงเล็กน้อยในแก๊สอาร์กอนเป็นการเพิ่มควมมีเสถียรภาพในการอาร์คอย่างมาก เพิ่มอัตราการถ่ายโอนน้ำโลหะของลวดเชื่อม ลดกระแสในช่วงการเปลี่ยนแปลงการถ่ายโอนแบบเมตละเยียดลงและมีผลต่อรูปร่างแนวเชื่อม ทำให้บ่อหลอมมีความเหลวและน้ำโลหะสามารถแผ่ขยายตัวออกได้กว้างขึ้น นอกจากนี้แก๊สผสมอาร์กอน-ออกซิเจนมีผลทำให้การซึมลึกของแนวเชื่อมลึกและแคบทำให้เสี่ยงต่อการเกิดรูพรุนในขณะเย็นตัวได้ง่าย

1. แก๊สผสมอาร์กอน + 1% ออกซิเจน แก๊สผสมชนิดนี้ใช้สำหรับการถ่ายโอนแบบเมตละเยียดในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งปริมาณเพียง 1% ออกซิเจน สามารถทำให้อาร์คมีความคงที่ เพิ่มอัตราการถ่ายโอนและปรับปรุงลักษณะรอยเชื่อมได้

2. แก๊สผสมอาร์กอน + 2% ออกซิเจน แก๊สผสมชนิดนี้ใช้สำหรับการถ่ายโอนแบบเมตละเยียดในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสมต่ำและเหล็กกล้าไร้สนิม ช่วยในการปรับปรุงสมบัติด้านการเป็ยตัวเมื่อผสมออกซิเจนมากกว่า 1% สมบัติเชิงกลและความต้านทานการกัดกร่อนของรอยเชื่อมที่ได้จากการผสม 1% ออกซิเจนและ 2% ออกซิเจนมีค่าไม่แตกต่างกัน

3. แก๊สผสมอาร์กอน + 5% ออกซิเจน แก๊สผสมชนิดนี้ให้สมบัติการไหลตัวของน้ำโลหะค่อนข้างสูงแต่ยังสามารถควบคุมบ่อรอยเชื่อมและเพิ่มความเร็วในการเชื่อมขึ้นได้ ส่วนใหญ่นิยมใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน

2.4.2.2 แก๊สผสมอาร์กอน + คาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สผสมชนิดนี้ใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำเป็นหลัก และมีข้อจำกัดสำหรับการใช้กับเหล็กกล้าไร้สนิม การเติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สอาร์กอนจะช่วยให้การเชื่อมเร็วขึ้นโดยการซึมลึกและความกว้างแนวเชื่อมที่ดี การเพิ่มปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของสะเก็ดไฟเชื่อมและลดประสิทธิภาพการถ่ายโอนน้ำโลหะลง ในการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลูมที่ใช้แก๊สผสมชนิดนี้จะต้องให้กระแสไฟเชื่อมค่อนข้างสูงเพื่อที่จะทำให้เกิดการถ่ายโอนแบบเม็คละเอียดยิ่ง หากผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 20% การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบเม็คละเอียดยิ่งจะไม่คงที่

1. แก๊สผสมอาร์กอน + 2% ถึง 10% คาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สผสมชนิดนี้ใช้สำหรับการถ่ายโอนแบบเม็คละเอียดยิ่ง ซึ่งเม็คละเอียดยิ่งแบบพัลส์และการถ่ายโอนแบบลัดวงจรในการเชื่อมเหล็กที่มีความหนาแตกต่างกัน อาร์กอนที่มีการผสม 2% คาร์บอนไดออกไซด์ลงไปมักใช้สำหรับการเชื่อมพัลส์ของเหล็กกล้าไร้สนิม ส่วนอาร์กอนผสม 5% คาร์บอนไดออกไซด์อาจใช้กับการเชื่อมพัลส์ของเหล็กกล้าผสมต่ำ เมื่อผสม 5% ถึง 10% คาร์บอนไดออกไซด์ จะทำให้ค่าของการอาร์คถูกบีบให้แคบลง

2. แก๊สผสมอาร์กอน + 15% ถึง 20% คาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สผสมในช่วงนี้ใช้สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำ สามารถนำไปเชื่อมกับเหล็กแผ่นบางได้ดี ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการเชื่อมทะลุลงได้ รวมทั้งให้อัตราการเติมและความเร็วในการเชื่อมที่ดี การลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ให้น้อยลงจะช่วยให้การปรับปรุงประสิทธิภาพการเติมเนื้อรอยเชื่อมโดยการลดการสูญเสียที่เกิดจากสะเก็ดไฟเชื่อมลง

3. แก๊สผสมอาร์กอน + 21% ถึง 49% คาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สผสมชนิดนี้ใช้กับการถ่ายโอนแบบลัดวงจรของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ นอกจากนี้แก๊สผสมชนิดนี้สามารถใช้ได้ดีในช่วงกระแสไฟสูงสำหรับการเชื่อมเหล็กแผ่นหนา

แก๊สปกคลุมรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมของกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลูม ตามการแนะนำของ AWS C5.10 แสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การเลือกใช้แก๊สปกคลุมสำหรับกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมเหล็กกล้าไร้สนิม
[5]

ความหนาชิ้นงาน	รูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะ	แก๊สปกคลุมที่แนะนำ
น้อยกว่า 2 มิลลิเมตร	ลัดวงจร	Ar + 2%CO ₂ Ar + 5%CO ₂
มากกว่า 2 มิลลิเมตร	ลัดวงจร	He + 7.5%Ar + 2.5%CO ₂ Ar + 2 - 5%CO ₂ Ar + He + CO ₂ He + 43%Ar + 2%CO ₂
	เม็ดละเอียด	Ar + 1%O ₂ Ar + 2%O ₂ Ar + He + CO ₂ He + Ar + CO ₂
มากกว่า 2 มิลลิเมตร	เม็ดละเอียดพัลส์	Ar + 1%O ₂ Ar + 2%O ₂ Ar + He + CO ₂ He + Ar + CO ₂ Ar + CO ₂ + H ₂

สำหรับแก๊สผสมอาร์กอน – ออกซิเจน มีผลต่อการเกิดออกไซด์ชั้นบางส่วนในบ่อหลอมของรอยเชื่อม ซึ่งจะทำให้เกิดสมบัติการเปื่อยตัวที่ดี และช่วยปรับปรุงความคงที่ในการอาร์คเมื่อใช้ร่วมกับแก๊สอาร์กอนที่บริสุทธิ์ ส่วนแก๊สผสม Ar – 1%O₂ และ Ar – 2%O₂ ได้รับความนิยมอย่างมากสำหรับการเชื่อมด้วยการถ่ายโอนแบบเม็ดละเอียด แก๊สผสม He – Ar ที่ผสมด้วย 2 – 3%CO₂ มักใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่ต้องการการถ่ายโอนแบบลัดวงจร สำหรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์หรือแก๊สอาร์กอนผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่ 10% ขึ้นไป สามารถนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดคาร์บอนต่ำ การดูดซับคาร์บอนเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียเฟอร์ไรต์และส่งผลเสียต่อความต้านทานการกัดกร่อนในรอยเชื่อม ด้วยเหตุนี้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จึงไม่แนะนำให้ใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม

2.4.3 รอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม

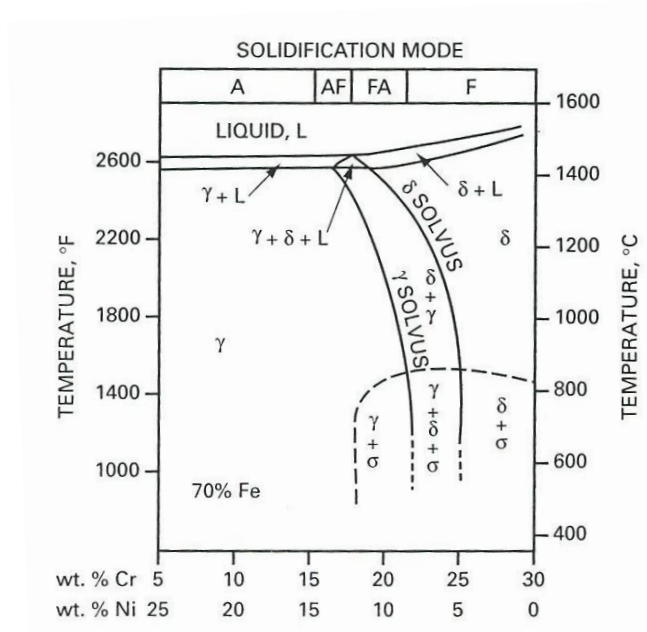
โดยทั่วไปโครงสร้างของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกประกอบด้วยเฟสหลักที่เป็นออสเทนไนต์ โดยมีปริมาณเฟอร์ไรต์อยู่ในช่วง 0 – 30FN สำหรับกระบวนการเชื่อมอาร์ค สมดุลเฟสจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมของรอยเชื่อมและกระบวนการที่มีผลต่อการแข็งตัวของรอยเชื่อมและอัตราการเย็นตัว รอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่แข็งตัวจะมีออสเทนไนต์หรือเฟอร์ไรต์เป็นเฟสหลัก เมื่อออสเทนไนต์เป็นเฟสหลัก รอยเชื่อมจะเป็นแบบออสเทนไนต์ทั้งหมดหรือมีปริมาณสัดส่วนของเฟอร์ไรต์จำนวนเล็กน้อย โดยทั่วไปจะน้อยกว่า 3FN เฟอร์ไรต์ที่เกิดขึ้นนี้มักจะเรียกว่า ยูเทคติกเฟอร์ไรต์ (Eutectic ferrite) ซึ่งจะเกิดอยู่ที่ขอบเกรนย่อยเช่น เซลลูล่าหรือเดนไดรต์ของการแข็งตัว

เมื่อเฟอร์ไรต์เป็นเฟสหลัก ปริมาณเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อมจะถูกกำหนดโดยลักษณะการเปลี่ยนแปลง เฟอร์ไรต์เป็นออสเทนไนต์ที่เกิดขึ้นขณะรอยเชื่อมเย็นตัว ภายใต้สภาวะการแข็งตัวปกติจะมีปริมาณเฟอร์ไรต์อยู่ในช่วง 3FN – 20FN แม้ว่าลวดเชื่อมที่มีการเติมธาตุผสมที่สูงอย่างชนิด 312 ก็อาจจะเกิดเฟอร์ไรต์ในระดับที่สูงได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับของการละลายตัวของชิ้นงาน ซึ่งเฟอร์ไรต์อาจจะเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ ปริมาณเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อมสามารถจะแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะการเชื่อม ตัวอย่างเช่น การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Covered electrode) หากปล่อยระยะอาร์คในระหว่างการเชื่อมให้ห่างมากเกินไปจะเป็นสาเหตุในการสูญเสียโครเมียมมากขึ้น (โครเมียมเป็นธาตุที่สนับสนุนให้เกิดเฟอร์ไรต์) เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันและการละลายตัวของไนโตรเจนจากบรรยากาศที่มากขึ้น (ไนโตรเจนเป็นธาตุที่สนับสนุนให้เกิดออสเทนไนต์) จึงเป็นผลต่อการลดปริมาณของเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อมลง

2.5 การเกิดเคลดำเฟอร์ไรต์และเฟสซิกม่าในรอยเชื่อมออสเทนนิติก

2.5.1 เคลดำเฟอร์ไรต์

การเกิดเคลดำเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เป็นผลดีต่อการลดแนวโน้มของการแตกร้าวร้อนเนื่องจากการแข็งตัวในรอยเชื่อม โดยเคลดำเฟอร์ไรต์ที่ตกผลึกในโครงสร้างออสเทนไนต์เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงและแข็งตัวที่อุณหภูมิสูง สามารถอ้างอิงตามเฟสไดอะแกรมในรูปที่ 2.2 โดยเฟสปฐมภูมิของการแข็งตัวอาจเป็นออสเทนไนต์หรือเคลดำเฟอร์ไรต์ก็ได้ เมื่อเกิดการแข็งตัวขึ้นเป็นออสเทนไนต์ปฐมภูมิ เช่น ชนิด A และ AF โครงสร้างที่ตกผลึกสามารถเป็นได้ทั้งออสเทนไนต์ทั้งหมด (ชนิด A) หรือประกอบด้วยเฟอร์ไรต์จำนวนเล็กน้อย

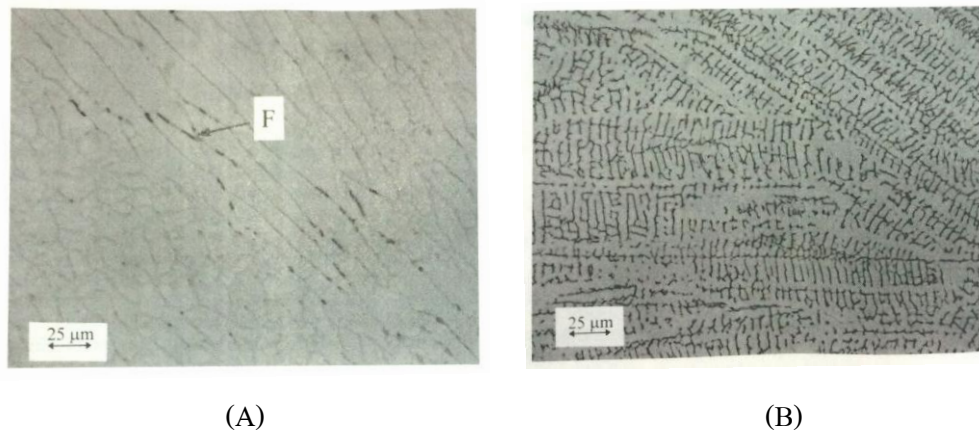


รูปที่ 2.2 เฟสไดอะแกรมของ Fe-Cr-Ni [2]

ยูเทคติกเฟอร์ไรต์ เกิดขึ้นจากสภาพการแข็งตัวของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ (ชนิด AF) เฟอร์ไรต์จะกระจายตัวไปตามขอบเกรนหรือขอบเกรนย่อย ยูเทคติกเฟอร์ไรต์ถูกแสดงในรูปที่ 2.3

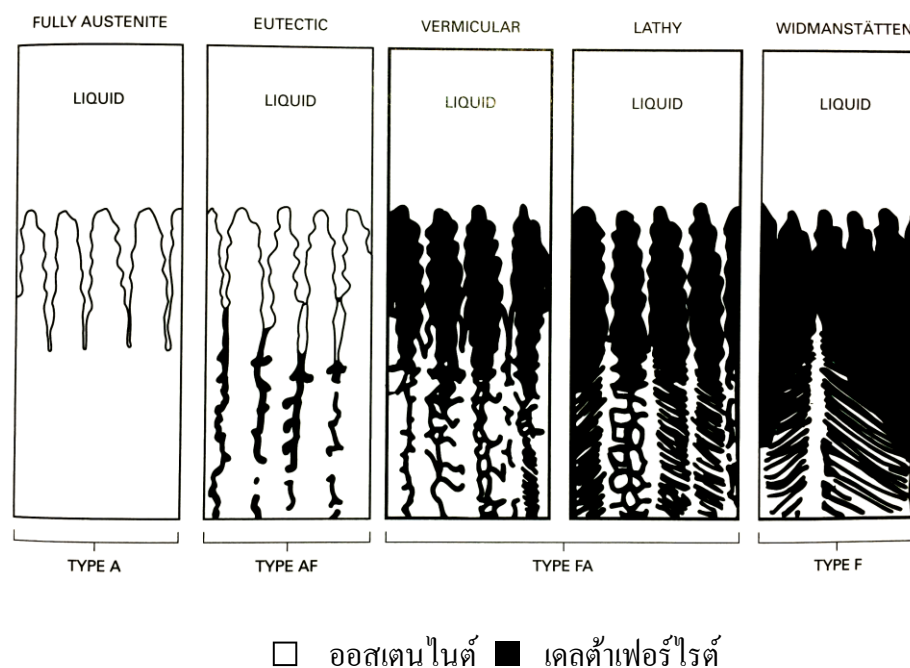
Vermicular หรือ Skeletal Ferrite เป็นรูปแบบเฟอร์ไรต์ที่พบเป็นส่วนใหญ่ในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เป็นผลมาจากการถูกควบคุมการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวในสภาพของแข็งของเฟอร์ไรต์กับออสเทนไนต์แล้วตามด้วยการแข็งตัวเป็นเฟอร์ไรต์ปฐมภูมิ (ชนิด FA) เฟอร์ไรต์ชนิดนี้เกิดตามแกนของเดนไดรต์หรือ Skeletal ของโครงสร้างการแข็งตัวของเฟอร์ไรต์ปฐมภูมิตามที่แสดงในรูปที่ 2.3

Lathy หรือ Acicular Ferrite เฟอร์ไรต์ชนิดนี้เกิดจากการแข็งตัวของเฟอร์ไรต์ปฐมภูมิด้วยเช่นเดียวกัน แต่เป็นสมบัติที่อยู่ในรูปของแผ่นหรือเข็มซึ่งจะขยายการแข็งตัวตามเกรนย่อย เฟอร์ไรต์ในรูปนี้เป็นชนิดที่อยู่ในรอยเชื่อมที่มีเฟอร์ไรต์สูงหรือเฟอร์ไรต์ต่ำที่มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วซึ่งมักจะสังเกตเห็นโครงสร้างแบบ Lathy และ Vermicular ผสมกัน



รูปที่ 2.3 โครงสร้างยูเทคติกเฟอร์ไรต์ (A) และโครงสร้าง Skeletal ferrite (B) [2]

แมทริกเฟอร์ไรต์กับ Widmanstätten Austenite รอยเชื่อมที่มีปริมาณเฟอร์ไรต์เพิ่มขึ้น เฟสเฟอร์ไรต์จะมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงและมีการเปลี่ยนแปลงเป็นออสเทนไนต์ ซึ่งจะเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์จนเกิดเคลด้าเฟอร์ไรต์ (ชนิด F) และมีออสเทนไนต์อยู่ในสภาพของแข็งเท่านั้น ผลที่เกิดขึ้นนี้ทำให้ออสเทนไนต์จะตกผลึกไปตามขอบเกรนระหว่างเฟสเฟอร์ไรต์ด้วยกันเองและนิวเคลียสของ Widmanstätten ซึ่งเหมือนกับเป็นการขยายตัวเข้าไปภายในเกรน เฟอร์ไรต์ในรูปนี้มีความสัมพันธ์แบบไม่ปกติในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก แต่เป็นปกติในชนิดดูเพล็กซ์ รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อมออสเทนนิติก

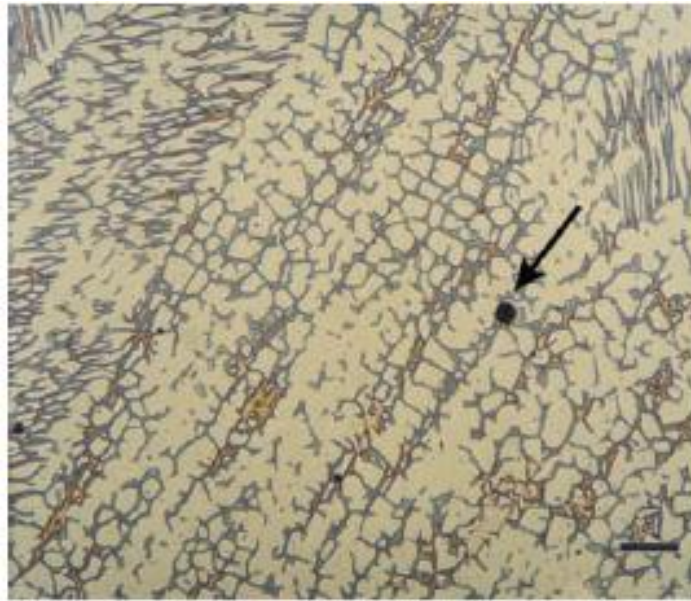


รูปที่ 2.4 รูปแบบเฟอร์ไรต์ชนิดต่างๆในรอยเชื่อมออสเทนนิติก [2]

2.5.2 เฟสซิกม่า

เฟสซิกมามีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล เกิดจากการตกผลึกที่อุณหภูมิระหว่าง $600 - 1,000^{\circ}\text{C}$ เฟสซิกม่าสามารถเพิ่มความแข็งแรงและลดความเหนียว (Toughness) รวมถึงการยึดตัวของเหล็ก เฟสซิกม่าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเซลล์เฟอร์ไรต์ (δ) ซึ่งเฟสซิกม่าที่เกิดขึ้นจะตกผลึกไปตามบริเวณที่มีความเข้มข้นของโครเมียมสูงและจะก่อตัวโดยตรงในบริเวณเซลล์เฟอร์ไรต์ เมื่อปริมาณโครเมียมมีค่าต่ำกว่า 20% โดยน้ำหนัก จะทำให้การตกผลึกของเฟสซิกม่าในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกไม่สามารถสังเกตได้โดยง่าย อย่างไรก็ตามหากปริมาณโครเมียมมีค่าระหว่าง 25 – 30% โดยน้ำหนัก จะทำให้เฟสซิกม่าสามารถก่อตัวขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากเซลล์เฟอร์ไรต์มีโครงสร้างผลึกแบบ Body centered cubic (BCC) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีโครเมียมสูงหากเทียบกับออสเทนไนต์ โดยโครเมียมถือเป็นธาตุที่สร้างเสถียรภาพให้แก่เฟอร์ไรต์และสามารถละลายตัวในเฟอร์ไรต์ได้ง่าย ดังนั้นเซลล์เฟอร์ไรต์จึงส่งผลต่อการตกผลึกของเฟสซิกม่า

สำหรับการย้อมสีโครงสร้างเพื่อจำแนกลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยาได้มีบันทึกมามากกว่า 80 ปีแล้ว ก่อนจะได้รับการพัฒนามาจนถึงปัจจุบัน การกัดกรดเพื่อทำให้เกิดสีของโครงสร้างได้รับการพัฒนาสำหรับโลหะเพียงไม่กี่ประเภทซึ่งค่อนข้างมีความยุ่งยากในการใช้ ชิ้นงานที่ต้องการทำให้เกิดสีของโครงสร้างสามารถทำได้โดยการจุ่มในสารละลาย การทำปฏิกิริยาไฟฟ้า และการอาศัยใช้ความต่างศักย์ของโครงสร้าง การย้อมสีโครงสร้างด้วยวิธีการจุ่มในสารละลายถือเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุด รูปที่ 2.5 และ 2.6 แสดงตัวอย่างโครงสร้างเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการย้อมสีโดยใช้สารละลาย Modified Murakami's reagent

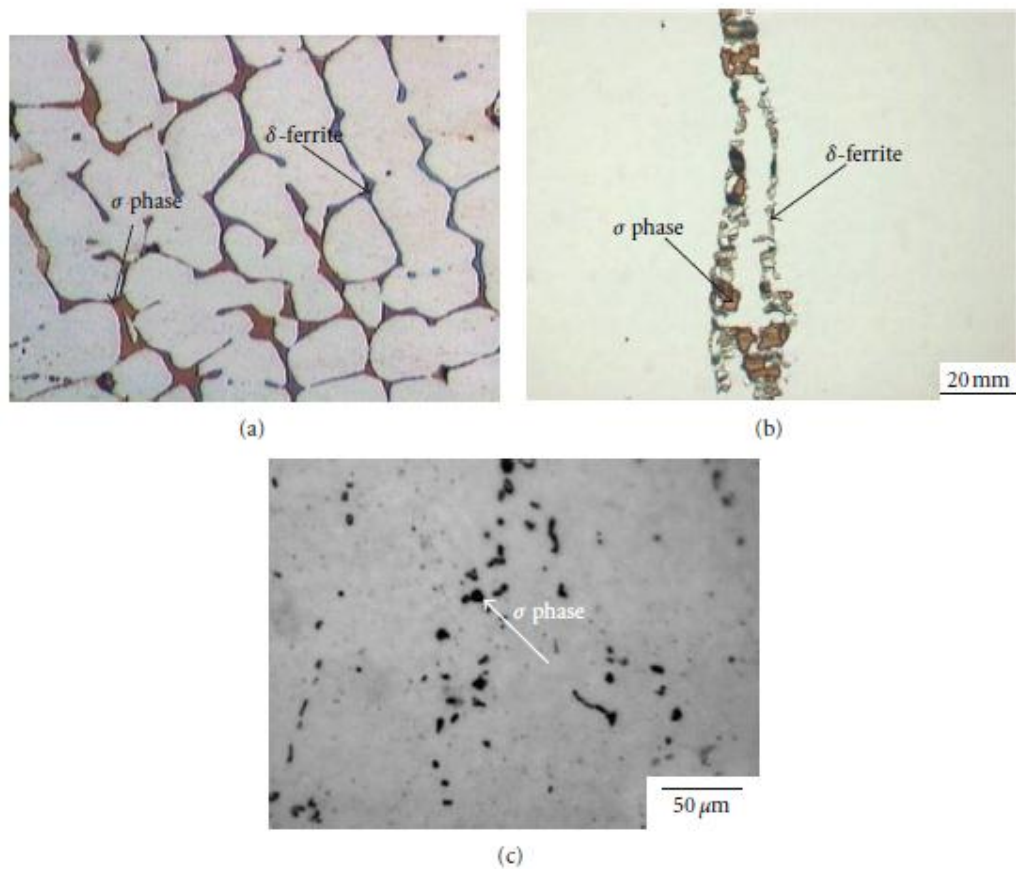


รูปที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคของเคลต้าเฟอร์ไรต์ (สีฟ้า) ในแมทริกซ์ของโครงสร้างออสเทนไนต์ (สีน้ำตาลอ่อน) ของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 312 โดยใช้สารละลาย Modified Murakami's reagent [6]



รูปที่ 2.6 การก่อตัวของเฟสซิกมา (สีเขียวและส้ม) จากเคลต้าเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 312 ที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 816°C เป็นเวลา 160 ชั่วโมง โดยใช้สารละลาย Modified Murakami's reagent [6]

โครงสร้างพื้นฐานของเฟสซิกม่าในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 309LSi ในสภาพหลังการหล่อ (As casting) แสดงในรูปที่ 2.7 (a) โดยเฟสซิกม่าตกผลึกในเดนไดรต์ของเซลล์เฟอร์ไรต์ รูปที่ 2.7 (b) แสดงโครงสร้างของเฟสซิกม่าในสภาพหลังการรีดของเหล็ก AISI 316 เฟสซิกม่ามีโครงสร้างแบบลายฉลุไปตามทิศทางของผลึกโครงสร้างอันเป็นผลเนื่องจากการรีด ส่วนรูปที่ 2.7 (c) แสดงโครงสร้างจุลภาคหลังการรีดของเฟสซิกม่าที่มีอัตราการรีด 50% ของเหล็ก AISI 304 โดยมีการกระจายเฟสซิกม่าแบบสัณฐานกลมเกิดขึ้นซึ่งถือเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่มีความเสถียร

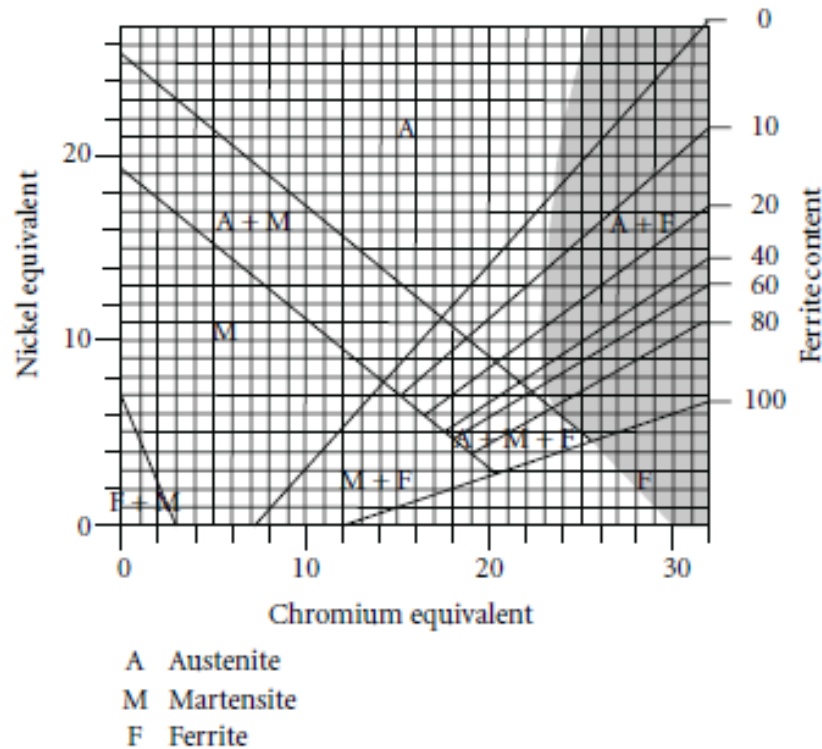


รูปที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคของเฟสซิกม่าในสภาวะการทำงานที่แตกต่างกันของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (a) สภาพหลังการหล่อของ AISI 309LSi, (b) สภาพหลังรีดของ AISI 316, (c) สภาพผ่านอัตราการรีด 50% ของ AISI 304 [7]

การก่อตัวของเฟสซิกม่าย่อมส่งผลกระทบต่อสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมได้ดังนี้

1. การก่อตัวของบริเวณที่เปราะ บริเวณที่เปราะของเฟสซิกม่าจะก่อตัวขึ้นในระหว่างกระบวนการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการเชื่อมและอัตราการเย็นตัวจะต้องถูกควบคุมในระหว่างการเชื่อมเพื่อป้องกันไม่ให้เกรนโตขึ้นและเกิดการตกผลึกของเฟสซิกม่าที่เปราะ เพราะการตกผลึกของเฟสซิกม่าจะลดความเหนียวและการยึดตัวของวัสดุลง บริเวณที่เปราะ

ของเฟสซิกม่าสามารถแสดงในไดอะแกรมของเซฟเลอร์ในรูปที่ 2.8 โดยบริเวณสีเทาเป็นบริเวณที่เปราะของเฟสซิกม่าและเป็นบริเวณที่กว้างที่สุดที่สุดในบริเวณที่มีการผสมกันของโครงสร้างออสเทนไนต์กับเฟอร์ไรต์



รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมเซฟเลอร์แสดงบริเวณที่เปราะของเฟสซิกม่า [7]

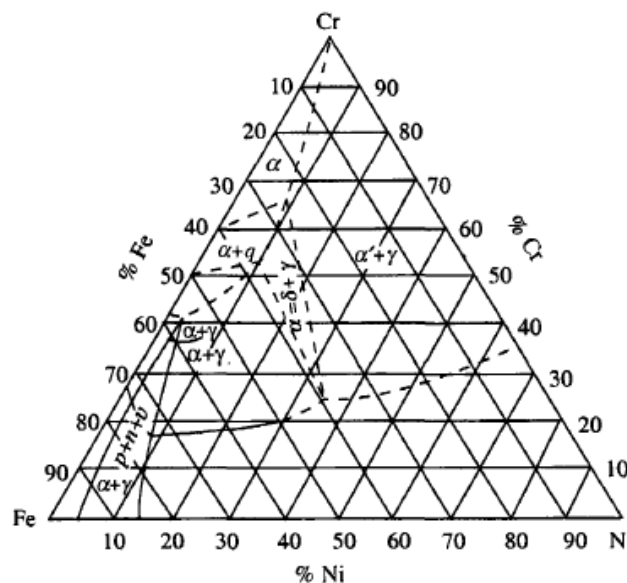
2. การขยายตัวของการแตกร้าวร้อนในระหว่างการเชื่อมพฤติกรรมของการแตกร้าวร้อนในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม 3 ชนิด พบว่าการแตกร้าวร้อนจะขยายตัวไปตามขอบเกรนของ γ/σ โดยบริเวณนี้จะเกิดการแตกหักเสียหายขึ้นก่อน การแตกร้าวนี้มีผลมาจากการก่อตัวของเฟสซิกม่า

3. การก่อตัวของบริเวณที่มีโครเมียมต่ำและการลดลงของความต้านทานการกัดกร่อน การตกผลึกของเฟสซิกม่า จะลดความต้านทานการกัดกร่อนตามขอบเกรน, การกัดกร่อนแบบหลุม และการกัดกร่อนแบบรอยแยก (Crevice corrosion) ซึ่งความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมมีความสัมพันธ์อย่างเป็นนัยสำคัญกับปริมาณโครเมียม ดังนั้นการกัดกร่อนแบบหลุมจึงมักเกิดขึ้นในบริเวณที่มีปริมาณโครเมียมต่ำเสมอ โดยปกติแล้วขอบเกรนออสเทนไนต์มีความสัมพันธ์ต่อการกัดกร่อนแบบหลุมเนื่องจากออสเทนไนต์มีปริมาณโครเมียมต่ำ ต่างจากเคลด้าเฟอร์ไรต์ที่เฟสซิกมามักจะก่อตัวขึ้นที่บริเวณขอบเกรนระหว่าง δ/γ และเป็นสาเหตุให้เกิดการก่อตัวของบริเวณที่มีโครเมียมต่ำ เฟสซิกม่าและออสเทนไนต์ต่างเหนียวทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิก โดยออสเทนไนต์จะถูกกัดกร่อนมากกว่าเฟสซิกม่า สำหรับเฟสซิกม่าที่ละเอียดมีผลต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรนมากกว่าเฟสซิกม่าที่

หายาบ เพราะว่าเฟสที่ละเอียดจะจับยึดกันเป็นโครงร่างไปตามขอบเกรน ส่วนเฟสที่หายาบมักจะเกิดขึ้นแบบเดี่ยวๆ วิธีการทำนายเฟสซิกม่า ส่วนผสมทางเคมีสามารถนำมาใช้ในการทำนายการตกผลึกของเฟสซิกม่าได้ โดยใช้สมการเพื่อตรวจสอบแนวโน้มการตกผลึกของเฟสซิกม่าดังนี้

$$\text{Ratio factor} = (\% \text{Cr} - 16\% \text{C}) / \% \text{Ni} \quad (2.1)$$

หาก Ratio factor มีค่ามากกว่า 1.7 เฟสซิกม่าสามารถตกผลึกในเหล็กกล้าไร้สนิมได้ เมื่อปริมาณคาร์บอนมีค่ามากขึ้นจะทำให้ Ratio factor ลดลง ส่งผลให้แนวโน้มการตกผลึกลดลง นอกจากนี้ค่าเทียบเท่าของโครเมียมและนิกเกิลสามารถนำมาใช้ในการประเมินความเป็นไปได้ในการก่อตัวของเฟสซิกม่าในระบบธาตุผสม Fe-Cr-Ni ที่อุณหภูมิสูงตามรูป 2.9 แนวโน้มการตกผลึกของเฟสซิกม่าในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกนั้นขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของออสเทนไนต์เหลือค้างที่เกิดขึ้นภายหลังการตกผลึกของคาร์ไบด์และไนไตรด์



รูปที่ 2.9 ไดอะแกรมสมดุลแสดง Fe-Cr-Ni ternary ที่อุณหภูมิ 650°C [8]

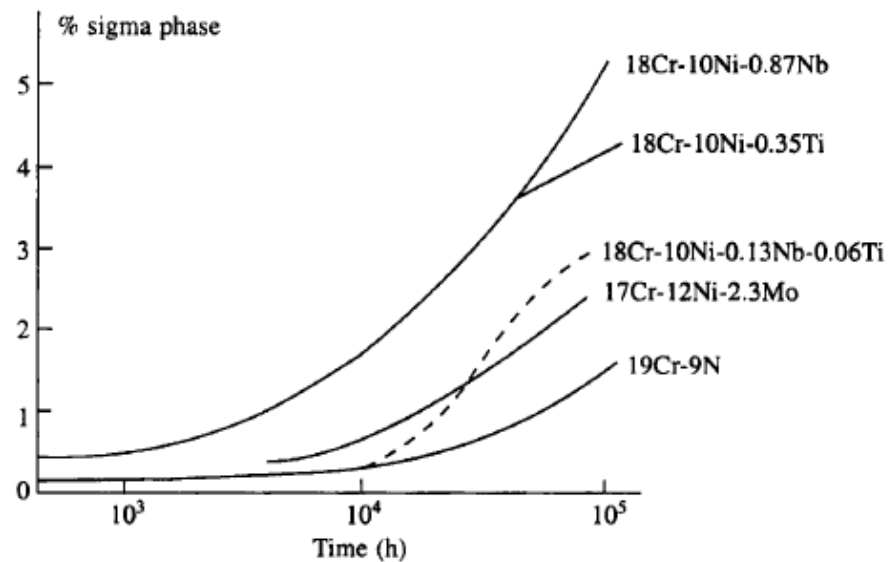
แนวโน้มการก่อตัวของเฟสซิกม่าในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกสามารถทราบได้จากสมการ Equivalent Chromium Content (ECC) ซึ่งมีสูตรสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ECC} = & \% \text{Cr} + 0.31\% \text{Mn} + 1.76\% \text{Mo} + 0.97\% \text{W} + 2.02\% \text{V} + 1.58\% \text{Si} + 2.44\% \text{Ti} \\ & + 1.7\% \text{Nb} + 1.22\% \text{Ta} - 0.266\% \text{Ni} - 0.177\% \text{Co} \end{aligned} \quad (2.2)$$

หากปริมาณโครเมียมเทียบเท่าของ ECC มีค่ามากกว่า 17 – 18% โดยน้ำหนัก เหล็กกล้าไร้สนิมจะมีความไวต่อการเกิดเฟสซิกม่า สมการดังกล่าวนี้ถูกปรับปรุงโดยการนำอิทธิพลของคาร์บอนไปหาร เรียกสมการที่ปรับปรุงว่า Normalized equivalent chromium content หรือ NECC โดยมีสมการดังนี้

$$\text{NECC} = \text{ECC} / \%C \quad (2.3)$$

จากสมการดังกล่าวได้ระบุถึงการตกผลึกของเฟสซิกม่าจะเกิดง่ายขึ้นตามปริมาณคาร์บอนของแมทริกซ์ที่ลดลง รูปที่ 2.10 แสดงอิทธิพลของธาตุผสมต่างๆที่มีผลต่อการตกผลึกของเฟสซิกม่า ซึ่งธาตุโครเมียม โมลิบดีนัม ไททาเนียม และไนโอเบียมต่างเป็นธาตุที่สนับสนุนให้เกิดเฟสซิกม่าขึ้น ในขณะที่อัตราการตกผลึกของเฟสซิกม่าสามารถถูกเร่งโดยการเติมธาตุซิลิกอนลงไป 2 – 3%

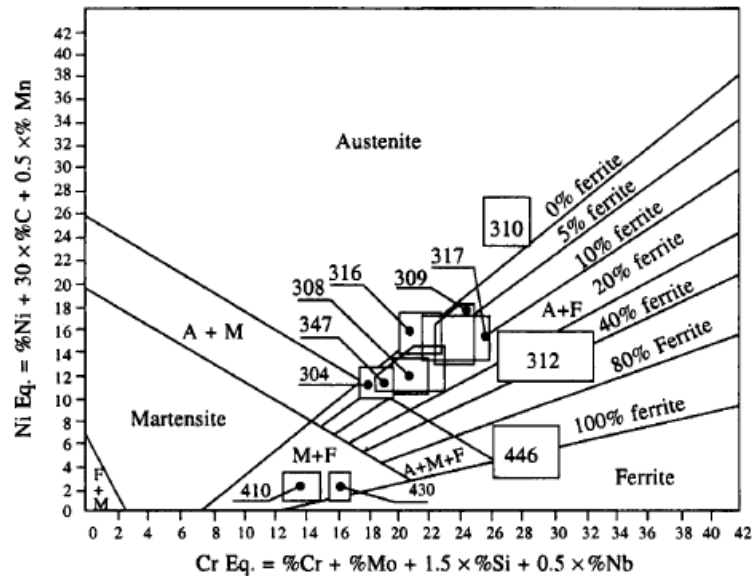


รูปที่ 2.10 อัตราการตกผลึกของเฟสซิกม่าที่อุณหภูมิ 700°C [8]

การตกผลึกของเฟสซิกม่าถูกควบคุมได้ทั้งอัตราการกระจายตัวของโครเมียมและธาตุที่มีผลต่อการก่อตัวของเฟสซิกม่า นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมด้วยการเกิดนิวเคลียส โดยส่วนผสมทางเคมีของเฟสซิกม่านั้นมีอิทธิพลที่แตกต่างกันตามชนิดของเหล็กกล้าออสเทนนิติก ขึ้นอยู่กับระยะเวลาและอุณหภูมิที่เหล็กได้รับ

ค่าความร้อนเข้าในระหว่างการเชื่อมก็มีความสำคัญต่อการตกผลึกของเฟสซิกม่าและเฟสอื่นๆ โดยการป้อนความร้อนเข้าที่สูงแก่รอยเชื่อมจะชะลอการสลายตัวของเคลด้าเฟอร์ไรต์ ดังนั้นจึงมีผลต่อการตกผลึกของเฟสซิกม่า การตกผลึกของเฟสซิกม่าจะเกิดกับ Vermicular ferrite ได้เร็วกว่าใน Lacy

ferrite ซึ่งเฟสซิกมาที่เกิดขึ้นมีผลต่อค่าแรงดึงและความเหนียวคืบ (creep ductility) ของเหล็กกล้าไร้สนิมรูปที่ 2.11 แสดงปริมาณเฟอร์ไรต์ที่เกิดขึ้นในเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.11 ปริมาณเฟอร์ไรต์ในเหล็กกล้าไร้สนิม [8]

2.6 การทำนายและการวัดปริมาณเฟอร์ไรต์

ปริมาณเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกสามารถทำนายได้จากส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อม กว่า 40 ปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาไดอะแกรมที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณเฟอร์ไรต์ โดยปกติการสร้างเครื่องมือทำนายเหล่านี้ต้องมีความสัมพันธ์กับระดับธาตุที่ส่งผลต่อการเกิดเฟอร์ไรต์ เช่น โครเมียม ซิลิกอน โมลิบดีนัม ไนโอเบียม และไททาเนียม ธาตุที่ทำให้เกิดออสเทนไนต์ เช่น นิเกิล แมงกานีส คาร์บอน ไนโตรเจน ทองแดง ซึ่งผลเทียบเท่าของธาตุเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์ต่อโครงสร้างเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์ที่มาจากโครเมียมและนิเกิลตามลำดับ ธาตุต่างๆเช่นคาร์บอนและไนโตรเจน เป็นธาตุที่สามารถทำให้เกิดออสเทนไนต์ได้ดีกว่านิเกิล และการเปลี่ยนแปลงธาตุเหล่านี้เพียงเล็กน้อยสามารถส่งผลกระทบต่ออิทธิพลของปริมาณเฟอร์ไรต์ได้ ส่วนธาตุผสมตัวอื่นๆจะมีผลกระทบที่น้อยกว่านี้ ความสัมพันธ์เหล่านี้สามารถแสดงในรูปไดอะแกรมของส่วนผสม เช่น ไดอะแกรมเชฟเฟอร์ (Schaeffler diagram) ไดอะแกรมเดอลอง (DeLong diagram) และไดอะแกรม WRC – 1992

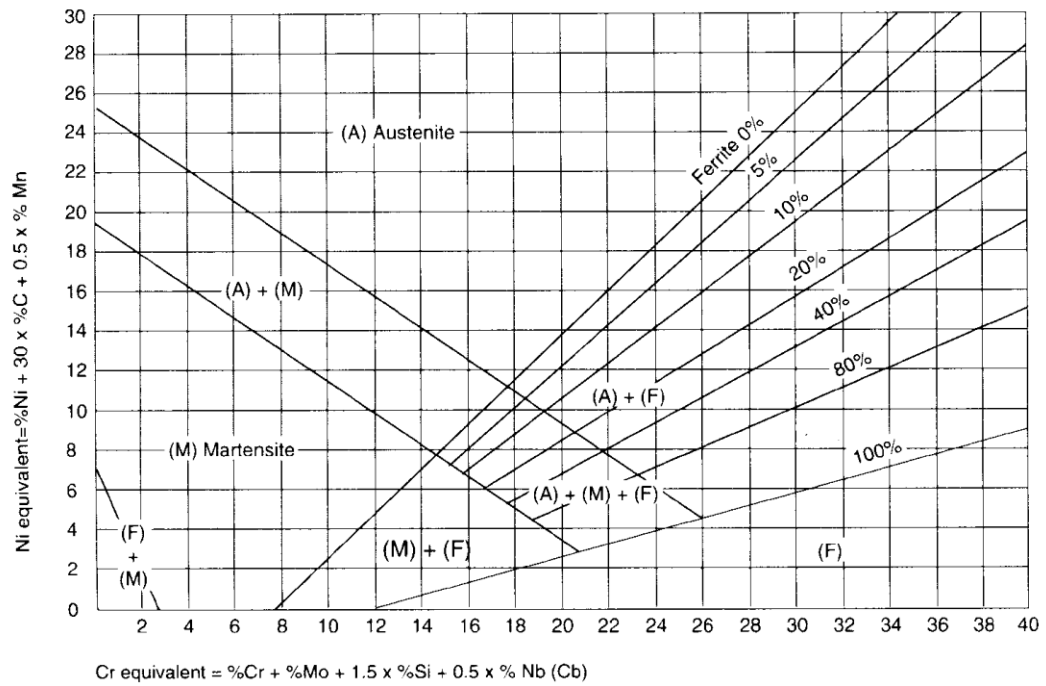
สำหรับไดอะแกรมเชฟเฟอร์ มีการผนวกส่วนผสมทางเคมีในช่วงที่กว้างกว่าไดอะแกรมเดอลอง และไดอะแกรม WRC – 1992 และมีข้อดีเมื่อใช้ทำนายการเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าต่างชนิดกันกับ

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก อย่างไรก็ตามความแม่นยำของไดอะแกรมนี้ต่อการทำนายปริมาณเฟอไรต์ในรอยเชื่อมยังน้อยกว่าไดอะแกรมเดอลองและไดอะแกรม WRC – 1992 ในการเปรียบเทียบ ไดอะแกรม WRC – 1992 กับไดอะแกรมเดอลอง ได้มีการออกแบบด้วยการแทนค่าโดยบอกให้ทราบถึงปัจจัยเทียบเท่าของเมงกานีสและซิลิกอนที่ต้องมีการกำจัดออกไปในสมการของ WRC – 1992 และปัจจัยที่มีผลอย่างคาร์บอน ไนโตรเจน โมลิบดีนัม และไนโอเบียม จะมีการระบุไว้ สำหรับไดอะแกรม WRC – 1992 จะแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงการแข็งตัว (A, AF, FA, และ F) ที่เกิดขึ้นในเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนไนต์และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดดูเพล็กซ์

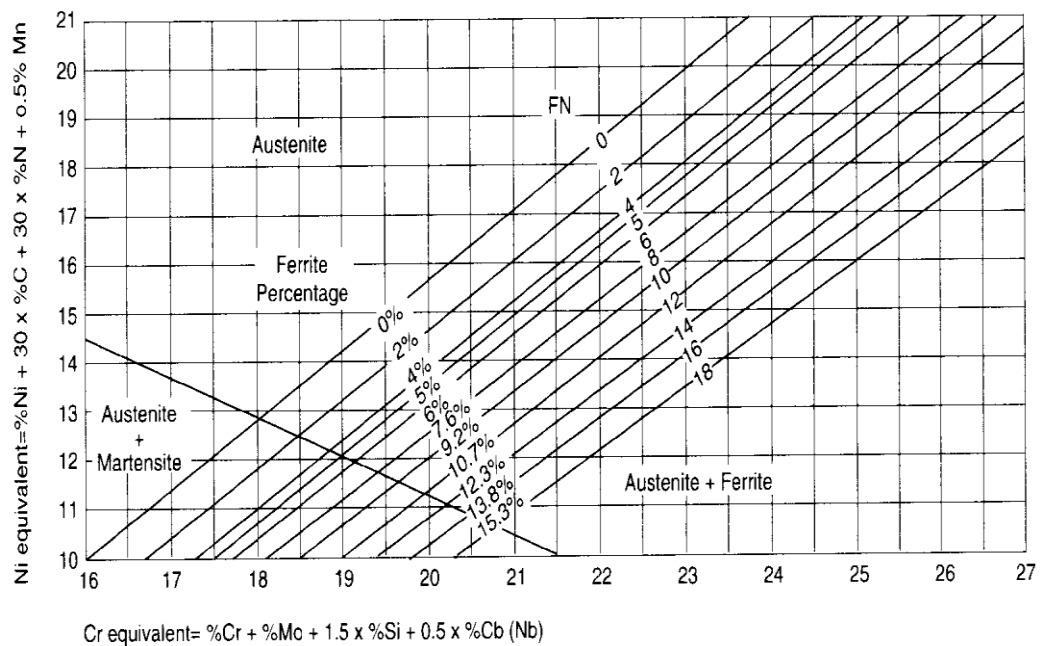
2.6.1 วิธีการวัดปริมาณเฟอไรต์

2.6.1.1 อุปกรณ์แม่เหล็ก (Magnetic device) เฟอไรต์เป็นโครงสร้างที่แม่เหล็กดูดติด ขณะที่ออสเทนไนต์เป็นโครงสร้างที่แม่เหล็กดูดไม่ติด ลักษณะเหล่านี้ถูกใช้ในการวัดปริมาณเฟอไรต์ในรอยเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกโดยการใช้อุปกรณ์แม่เหล็ก สำหรับอุปกรณ์ดังกล่าวประกอบด้วย Ferrite Indicator, Magne Gage และ Ferrite scope

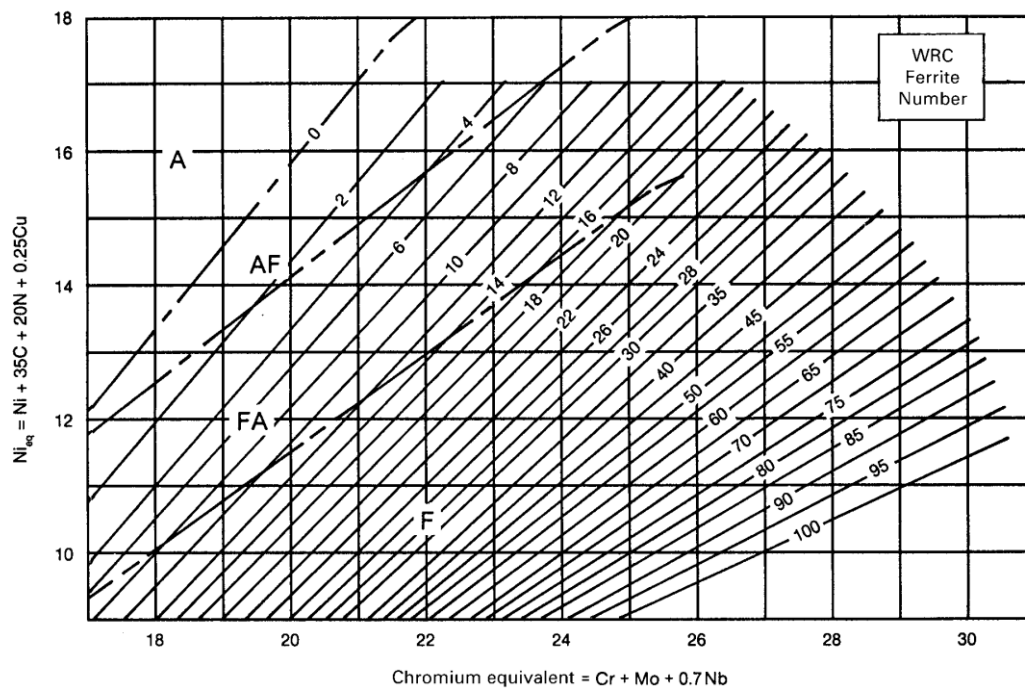
2.6.1.2 เฟสไดอะแกรม (Phase diagram) เริ่มแรกต้องมีการคำนวณค่า Ni_{eq} และ Cr_{eq} ของรอยเชื่อมตามสมการที่ให้ไว้ในเฟสไดอะแกรม จากนั้นจึงทำการกำหนดจุดลงในเฟสไดอะแกรมเพื่อวัดปริมาณเฟอไรต์ของรอยเชื่อม เฟสไดอะแกรมที่มีการใช้บ่อยคือเซฟเลอร์, เดอลองและ WRC-1992 ตามที่แสดงในรูปที่ 2.12 – 2.14 ตามลำดับ สำหรับไดอะแกรมเซฟเลอร์มีการใช้อย่างกว้างขวางกว่าแบบเดอลองและ WRC-1992 รวมทั้งมีข้อดีกว่าหากใช้ในการทำนายรอยเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าต่างชนิดกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ส่วนไดอะแกรม WRC-1992 มีการใช้ในรูปแบบของโครเมียมเทียบเท่าในรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์ด้วย



รูปที่ 2.12 ไคอะแกรมเชฟเฟอร์ [9]



รูปที่ 2.13 ไคอะแกรมเดอลอง [9]



รูปที่ 2.14 ไดอะแกรม WRC-1992 [9]

2.6.1.3 วิธีการนับจุดของโครงสร้าง (Microscopic point counting method) ปริมาณเฟอร์ไรต์ถูกกำหนดโดยเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่เฟอร์ไรต์ในโครงสร้าง เปอร์เซ็นต์พื้นที่เฟอร์ไรต์ถูกกำหนดโดยสมการดังต่อไปนี้

$$\alpha = [n / (P \times f)] \times 100 \quad (2.4)$$

เมื่อ α คือเปอร์เซ็นต์ของเฟอร์ไรต์, n คือจำนวนของจุดตารางที่ใช้ร่วมกันโดยเฟสเฟอร์ไรต์, P คือจำนวนตารางทั้งหมด ($20 \times 20 = 400$), f คือความถี่ของการทดสอบ (60 ตามมาตรฐาน) ซึ่งปริมาณเฟอร์ไรต์ถูกแสดงออกมาในรูปของเปอร์เซ็นต์เฟอร์ไรต์หรือจำนวนเฟอร์ไรต์ สิ่งสำคัญที่จะต้องรู้ คือ ปริมาณเฟอร์ไรต์ที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อมจะแปรเปลี่ยนไปตามวิธีดำเนินการเชื่อม เช่น ขนาดลวดเชื่อม พารามิเตอร์ของการเชื่อม (กระแส แรงดันไฟฟ้า และความเร็วในการเชื่อม) ตำแหน่งท่าเชื่อม ลำดับ เที้ยวเชื่อม ความกว้างของการสายลวด และความสามารถของช่างเชื่อม

2.6.2 ผลของกระบวนการและวิธีดำเนินการเชื่อม

กระบวนการเชื่อม สถานะการเชื่อม และเทคนิคการเชื่อมมีอิทธิพลสำคัญต่อส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อมและปริมาณเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อม ปัจจัยเหล่านี้จะต้องมีการนำมาพิจารณาหากมีการระบุ

ส่วนผสมทางเคมีหรือจำกัดปริมาณเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อมเกิดขึ้น โดยทั่วไปกระบวนการเชื่อมทิกจะให้การเปลี่ยนแปลงของส่วนผสมทางเคมีจากลวดเชื่อมที่น้อยที่สุด กระบวนการนี้จะให้ผลที่มีค่าความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างการทำนายและการหาค่าจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อม อย่างไรก็ตามค่าความร้อนเข้าและอัตราการเย็นตัวก็ได้รับการพิจารณาด้วยเช่นเดียวกัน

สำหรับกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมมีการสูญเสียคาร์บอนประมาณ 1 ใน 4 ของกระบวนการเชื่อมทิก อย่างไรก็ตามการตีคมาของไนโตรเจนกับลวดเชื่อมจะมีค่าที่สูงมากและควรขจัดออกไปให้อยู่ที่ประมาณ 0.04% โดยน้ำหนัก การตีคมาของไนโตรเจนในกระบวนการเชื่อมนี้มีผลที่ขึ้นอยู่กับเทคนิคการเชื่อมและอาจมีค่าสูงถึง 0.15% โดยน้ำหนัก ด้วยเหตุนี้อาจส่งผลให้เกิดเฟอร์ไรต์น้อยหรือไม่มีเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อมของลวดเดิม เช่น ER308 และ ER309 การเกิดออกซิเดชันเพียงเล็กน้อยบวกกับการสูญเสียจากการระเหยอาจมีผลต่อปริมาณแมงกานีส ซิลิกอน โครเมียม นิกเกิล และโมลิบดีนัม คุณภาพของการป้องกันบรรยากาศโดยแก๊สปกคลุมจะมีความสัมพันธ์ต่อค่าแรงดันอาร์ค ขนาดของน็อชเชิล ระยะน็อชเชิลกับชิ้นงานเชื่อม และอัตราการไหลของแก๊ส โดยอัตราการไหลของแก๊สจะรับเอาไนโตรเจนเข้ามามากขึ้นเมื่อเกิดการไหลแบบปั่นป่วน

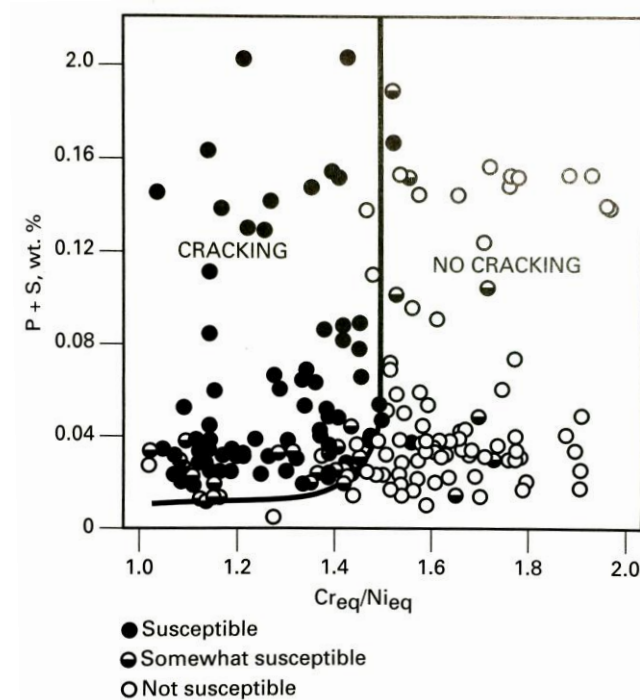
2.6.3 อิทธิพลของเฟอร์ไรต์ต่อการแตกร้าวของรอยเชื่อม

มีหลายทฤษฎีได้อธิบายผลดีของการมีเคลด้าเฟอร์ไรต์ในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก แนวคิดดังกล่าวประกอบด้วยหัวข้อดังนี้

1. ธาตุมลทิน เช่น กำมะถันและฟอสฟอรัส มีความสามารถในการละลายในเฟอร์ไรต์ที่สูง ดังนั้นเฟอร์ไรต์จึงทำหน้าที่เป็นสถานที่กักเก็บธาตุมลทินที่จะก่อให้เกิดการแตกร้าวขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. รอยเชื่อมที่ประกอบด้วยเคลด้าเฟอร์ไรต์จะมีช่วงห่างระหว่างอุณหภูมิการแข็งตัวน้อย
3. เฟอร์ไรต์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ เนื่องจากระบบผลึกเป็นแบบ BCC ซึ่งต่ำกว่าออสเทนไนต์ที่มีระบบผลึกเป็น FCC นอกจากนี้เฟอร์ไรต์ช่วยลดความเค้นอันเนื่องจากการหดตัวที่เกี่ยวข้องกับการแข็งตัวและเย็นตัวของรอยเชื่อม
4. ความแตกต่างของพลังงานที่ผิวสัมผัสระหว่างออสเทนไนต์กับเคลด้าเฟอร์ไรต์ในช่วงอุณหภูมิการแข็งตัว จะป้องกันการจับตัวของฟิล์มของเหลวซึ่งเป็นผลมาจากการแยกตัวของธาตุผสมและธาตุมลทิน ในรอยเชื่อมที่มีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมดจะมีการจับตัวของฟิล์มของเหลวได้ง่าย

5. โครงสร้าง 2 เฟสในรอยเชื่อมจะช่วยยับยั้งการขยายตัวของการแตกร้าวซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างอสเทนไนต์ ดังนั้นเฟอร์ไรต์ที่อยู่ในรอยเชื่อมจะมีแนวการแตกร้าวที่คดเคี้ยวมากกว่ารอยเชื่อมที่เป็นอสเทนไนต์ทั้งหมด

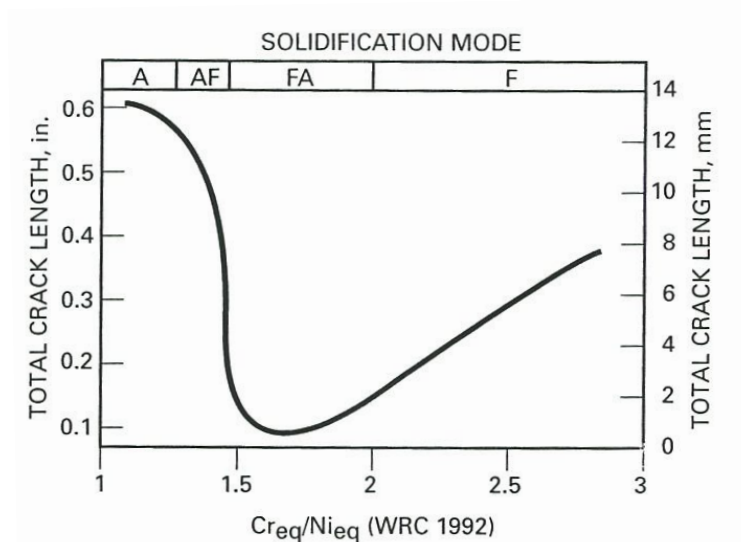
ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมของรอยเชื่อมกับความต้านทานการแตกร้าวนั้น ถูกแสดงได้ดีที่สุดโดยใช้ Suutala ไดอะแกรมตามที่แสดงในรูปที่ 2.15 เมื่อปริมาณกำมะถันกับฟอสฟอรัสมีค่าต่ำหรือน้อยกว่า 100 ppm ก็จะทำให้ความไวต่อการแตกร้าวที่ต่ำ หากระดับกำมะถันกับฟอสฟอรัสสูงขึ้นความไวต่อการแตกร้าวจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่ระดับอัตราเทียบเท่าระหว่างโครเมียมกับนิกเกิลเท่ากับ 1.48 การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วนี้แสดงถึงพฤติกรรมการแข่งขันตัวจากอสเทนไนต์ปฐมภูมิ (ต่ำกว่า 1.48) ถึงเฟอร์ไรต์ปฐมภูมิ (สูงกว่า 1.48)



รูปที่ 2.15 Suutala diagram เมื่อใช้ทำนายความไวในการแข็งตัวของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก [2]

ความสัมพันธ์ระหว่างความไวต่อการแตกร้าวเนื่องจากการแข็งตัวของรอยเชื่อมกับพฤติกรรมการแข่งขันตัวเมื่อเทียบกับอัตราเทียบเท่าระหว่างโครเมียมกับนิกเกิลแสดงในรูปที่ 2.16 ความไวต่อการแตกร้าวจะสูงขึ้นเมื่อรอยเชื่อมเป็นอสเทนไนต์ทั้งหมด หากมีปริมาณเฟอร์ไรต์เกิดขึ้นความไวต่อการแตกร้าวเนื่องจากการแข็งตัวจะลดลง อย่างไรก็ตามความไวต่อการแตกร้าวนี้จะเพิ่มขึ้นหากปริมาณ

เฟอร์ไรต์เกิน 30FN เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเป็นเฟอร์ริติกที่แข็งตัวอย่างสมบูรณ์จาก FA เป็น F ที่แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.16 ความไวต่อการแตกร้าวเทียบกับจำนวนเฟอร์ไรต์ [2]

2.7 การกัดกร่อนในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีโครงสร้างระบบผลึกเป็น FCC สามารถรักษาสมบัติการใช้งานให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง โครงสร้างที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากความสมดุลของการเติมธาตุผสม ทั้งนี้เพื่อรักษาเสถียรภาพของเฟสออสเทนไนต์ในช่วงอุณหภูมิสูงจนถึงอุณหภูมิแช่แข็ง (Cryogenic temperature) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยการทำเป็นสารละลายของของแข็ง หรือโดยการทำ work hardening เพราะมีเฟสเป็นลักษณะเฟสเดียว

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีการกัดกร่อน ตั้งแต่ระดับปานกลางถึงระดับที่รุนแรง นอกจากนี้ยังถูกใช้งานในช่วงอุณหภูมิแช่แข็งจนถึงอุณหภูมิสูงเกือบ 600°C โดยสามารถรักษาสมบัติความเหนียวที่อุณหภูมิต่ำ และสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้เป็นอย่างดี แต่เดิมเหล็กกล้าไร้สนิมมักจะมีผิวอ่อนไหวต่อการกัดกร่อน โดยเฉพาะการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion) มากกว่าโลหะกลุ่มอื่น ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาอิทธิพลของธาตุผสมต่างๆที่เติมลงไปในเหล็ก ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวสามารถแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 อิทธิพลของธาตุผสมที่เติมลงในเหล็กกล้าไร้สนิมต่อความต้านทานการกัดกร่อนแบบ
หลุม [10]

ธาตุผสม	ผลกระทบต่อความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม
โครเมียม	เพิ่มขึ้น
นิกเกิล	เพิ่มขึ้น
โมลิบดีนัม	เพิ่มขึ้น
ซิลิกอน	ลดลง แต่จะเพิ่มขึ้นในกรณีที่อยู่ร่วมกับโมลิบดีนัม
ไททาเนียมและโคบอลต์	ลดลงเมื่ออยู่ใน FeCl_3 แต่จะไม่มีผลเมื่ออยู่ในสารละลายอื่นๆ
กำมะถันและเซเลเนียม	ลดลง
คาร์บอน	ลดลง
ไนโตรเจน	เพิ่มขึ้น

2.8 การกัดกร่อนแบบหลุม [10]

การกัดกร่อนแบบหลุมเป็นการกัดกร่อนที่ทำให้เกิดรูหรือหลุมขึ้นในวัสดุ รูปแบบการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะทำลายโครงสร้างทางวิศวกรรมอย่างมาก หากการกัดกร่อนดังกล่าวก่อให้เกิดรูจนทะลุเนื้อโลหะขึ้น แต่ถ้าไม่มีรูทะลุผ่านเนื้อโลหะบางครั้งก็อาจนำไปใช้งานได้ แต่ก็มีบ่อยครั้งหลุมที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจสอบได้ยาก เนื่องจากหลุมเล็กๆเหล่านี้มักจะถูกปกคลุมด้วยผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกัดกร่อน (Corrosion product) นอกจากนี้จำนวนและความลึกของหลุมมักจะแตกต่างกันทำให้ยากที่จะประเมินความเสียหาย และหลุมเหล่านี้อาจก่อให้เกิดความเสียหายอย่างไม่คาดฝันได้

เมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน หลุมที่เกิดขึ้นอาจถูกเร่งทำให้เกิดเร็วขึ้นได้ แต่ถ้ามีการบำรุงรักษาที่ดี ก็อาจจะใช้เวลาเป็นเดือนหรือเป็นปีกว่าที่รูจะทะลุเนื้อเหล็กไป โดยปกติการเกิดหลุมจะใช้เวลาในช่วงแรก แต่เมื่อเกิดขึ้นแล้วหลุมก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ หลุมส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นตามทิศทางของแรงโน้มถ่วงของโลก และอยู่ที่ผิวส่วนล่างของวัสดุ

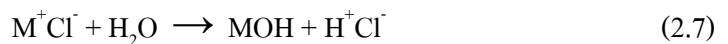
หลุมจะเริ่มเกิดขึ้นในบริเวณที่มีการเพิ่มอัตราเร็วในการกัดกร่อน หรือบริเวณที่มีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ หรือมีองค์ประกอบไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ความแตกต่างของความเข้มข้นของออกซิเจนหรือออกซิเจนอาจก่อให้เกิดเซลล์เกลวานิกอันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นเหล่านี้ ซึ่งก็เป็นผลทำให้เกิดหลุมขึ้น การที่หลุมใหญ่ขึ้นนั้นเชื่อว่าจะเกี่ยวข้องกับการละลายของโลหะภายในหลุมในขณะที่มีความเป็นกรดสูงที่ก้นหลุม สำหรับกรณีของโลหะจำพวกเหล็ก โลหะที่ก้นหลุมจะเป็นพวกแอโนดโดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือ



ส่วนปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดขึ้นที่ผิวของโลหะรอบๆ หลุม โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับน้ำ และอิเล็กตรอนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะดังนี้



ดังนั้นโลหะรอบๆ หลุมจึงถูกปกป้องโดยปฏิกิริยารีดักชันนี้ ซึ่งเรียกว่าเป็นการปกป้องแบบแคโทด การเพิ่มขึ้นของโลหะไอออนภายในหลุมนี้จะทำให้ปฏิกิริยารวมตัวกับคลอไรด์ไอออนเพื่อรักษาสภาพประจุให้เป็นกลางและโลหะคลอไรด์นี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำเพื่อผลิตโลหะไฮดรอกไซด์และกรดอิสระดังสมการ



จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของกรดที่ก้นหลุมสูงขึ้น ซึ่งจะเป็นผลให้อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะเกิดเร็วขึ้น และกระบวนการโดยรวมทั้งหมดจะเกิดในลักษณะ การเร่งปฏิกิริยาเอง (Autocatalytic)

2.8.1 กลไกการกัดกร่อนแบบหลุม

กลไกการกัดกร่อนแบบหลุมถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย กลไกการเริ่มต้น และกลไกการขยายตัว เฟสเริ่มต้นที่ผิดปกติมีผลอย่างยิ่งต่อแผ่นฟิล์มออกไซด์ที่ผิวชิ้นงาน ที่ขอบเกรน สารมลทิน เช่น ซัลไฟด์ ออกไซด์ ไนไตรด์ เป็นต้น รวมถึงการแยกตัวของธาตุผสมสามารถมีผลต่อความผิดปกติ ซึ่งจะเป็นจุดกำเนิดของการกัดกร่อนแบบหลุมได้

สำหรับการโตของหลุมที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในลักษณะการเร่งปฏิกิริยาเอง ซึ่งหมายถึง การเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนขึ้นภายในหลุมที่เป็นไปในลักษณะกระตุ้นต่อไปเรื่อยๆ การโตของหลุมมีความเกี่ยวข้องกับการไฮโดรไลซิสของไอออนโลหะที่ละลาย จึงทำให้มีค่า pH ในหลุมต่ำกว่าบริเวณรอบๆ ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของไอออนโลหะ M^{n+} ที่อยู่ภายในหลุมมีผลต่อการเคลื่อนย้ายตัวของคลอไรด์ไอออนเพื่อที่จะรักษาระดับความเป็นกลางไว้ โลหะคลอไรด์ถูกไฮโดรไลซิสขึ้นจากน้ำกับโลหะไฮดรอกไซด์และกรดอิสระ กรดที่เกิดขึ้นมีค่าความเป็นกลาง (pH) ต่ำบริเวณก้นหลุมในขณะที่ความเป็นกรดของสารละลายโดยรวมยังคงเป็นกลางอยู่ การละลายโลหะบริเวณก้นหลุมจะถูกสมดุลโดยปฏิกิริยาแค

โพลีคกรบริเวณผิวหน้าที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อนซึ่งจะอาศัยอิเล็กตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาแอโนดิก

2.8.2 ผลกระทบจากส่วนผสมทางเคมี

ผลกระทบจากธาตุผสมต่อการกัดกร่อนแบบหลุมได้รับการศึกษาอย่างมากมาย ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนเกี่ยวกับธาตุผสมหลักที่มีอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิม คือ โครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม และไนโตรเจน ธาตุเหล่านี้ช่วยในการปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม อย่างไรก็ตามผลของธาตุแมงกานีสถูกพบว่ามีผลเสียเนื่องจากการก่อตัวของซัลไฟด์ ธาตุมลทินและธาตุผสม เช่น ซัลเฟอร์, เซเลเนียม, ไทเทเนียม, ไนโอเบียมและซีเชียม ต่างก็มีผลเสียต่อความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม บทบาทของธาตุผสมหลักต่อความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมสามารถที่สรุปเป็นพารามิเตอร์ตามส่วนผสมทางเคมี ซึ่งก่อนหน้านี้ถูกเรียกว่า “Efficiency sum” และในปัจจุบันถูกเรียกว่า “Pitting resistance equivalent: (PRE)” ซึ่งมีรูปสมการเป็นดังนี้

$$PRE = \%Cr + (a) \times \%Mo + (b) \times \%N \quad (2.8)$$

เมื่อ a และ b คือ ค่าสัมประสิทธิ์

สำหรับการประเมินอุณหภูมิวิกฤตต่อความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม (CPT) ในสารละลาย 10%FeCl₃ โดยปกติแล้วค่าสัมประสิทธิ์ a มีค่าใกล้เคียง 3 ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะแทนค่าเท่ากับ 3.3 สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ b เป็นค่าที่ได้จากการศึกษาที่อยู่ระหว่าง 13 – 30

2.8.3 การกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อม

ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของรอยเชื่อมทำให้มีความอ่อนไหวต่อการเกิดการกัดกร่อนเฉพาะจุดมากกว่าบริเวณขึ้นงาน โดยการกัดกร่อนแบบหลุมจะเกิดขึ้นและขยายตัวได้ง่ายในบริเวณที่มีธาตุโครเมียม และโมลิบดีนัมน้อย เนื่องจากเกิดการแยกตัวแบบไมโคร (Microsegregation) และการแยกส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์และการก่อตัวของเฟสอื่นๆ

รูปแบบการแข็งตัวเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดหลุมและการขยายตัวของหลุม ในการแข็งตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมแบบออสเทนไนต์ทั้งหมด ส่วนใหญ่แกนของเดนไดรต์ถูกพบว่าเป็นบริเวณวิกฤตที่สุดในการเกิดและขยายตัวของหลุม ซึ่งเกิดขึ้นจากการแยกตัวแบบไมโครของโมลิบดีนัมและโครเมียมต่อบริเวณภายในเดนไดรต์ มีผลให้แกนเดนไดรต์อ่อนแอกว่าธาตุเหล่านี้ ในกรณีการแข็งตัวของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ หลุมจะถูกพบตรงบริเวณขอบเกรนนิวเคลียสของออสเทน

ไนต์และเดนไดรต์ของเฟอร์ไรต์ และขยายไปตามแกนเดนไดรต์ของออสเทนไนต์ ซึ่งก็เกิดขึ้นในกรณีเดียวกันกับการแข็งตัวของรอยเชื่อมเฟอร์ไรต์ปฐมภูมิ ที่แสดงให้เห็นว่าการเกิดหลุมที่บริเวณขอบเฟสของ δ/γ ซึ่งการขยายตัวของหลุมต่อออสเทนไนต์เกิดขึ้นห่างจากบริเวณที่ไม่ได้รับผลของโครงข่ายเฟอร์ไรต์ บทบาทของ δ/γ แสดงให้เห็นชัดเจนว่ามีผลเสียขึ้น การก่อตัวของหลุมที่บริเวณขอบเฟส δ/γ เกี่ยวข้องกับการลดลงของโครเมียมและโมลิบดีนัมที่บริเวณด้าน γ ซึ่งจะไปเพิ่มการตกผลึกของคาร์ไบด์ในบริเวณผิวสัมผัสของเฟส

2.9 การกัดกร่อนโดยเคมีไฟฟ้าของโลหะ

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับโลหะส่วนใหญ่มักเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าระหว่างโลหะกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะมีแผ่นฟิล์มบางๆของความชื้นบนผิวหน้าโลหะจะก่อตัวขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะการกัดกร่อน ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าแตกต่างจากปฏิกิริยาเคมีทั่วไปในประเด็นที่ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากโลหะไปสู่สิ่งแวดล้อม และมีการเปลี่ยนแปลงธาตุเป็นอ็อกไซด์หรือจากอ็อกไซด์เป็นธาตุ โดยปกติแล้วการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นถูกกำหนดโดยสมดุลระหว่างปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าประกอบด้วย Oxidation reaction และ Reduction reaction ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยามีลักษณะดังนี้

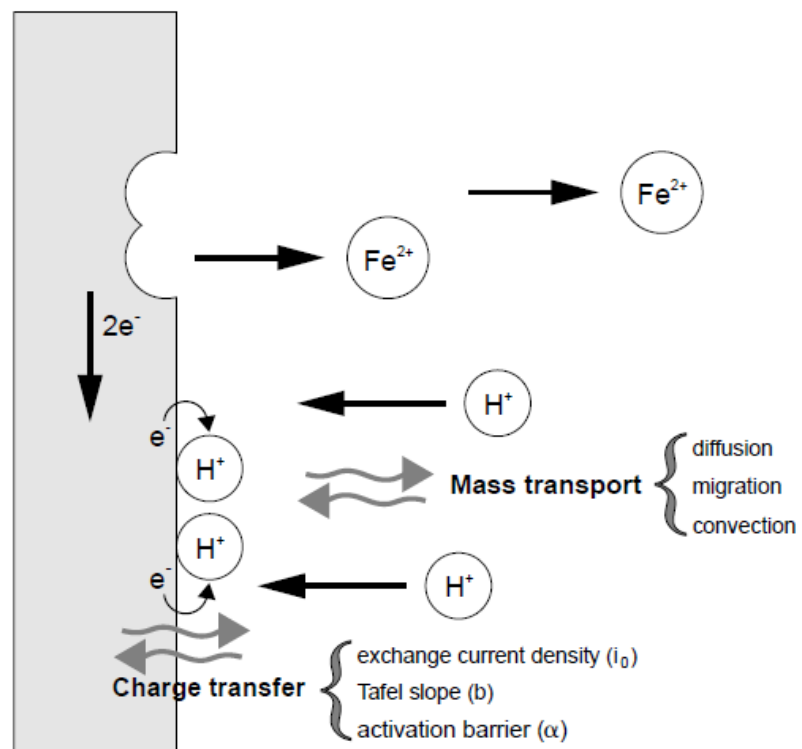
1. Oxidation reaction หรือ Anodic reaction จะเกิดที่ขั้วแอโนด โดยจะมีการผลิตอิเล็กตรอนและอะตอมของโลหะ ซึ่งทำให้บริเวณแอโนดจะมีการผุกร่อนเพราะโลหะที่เป็นแอโนดจะละลายกลายเป็นอ็อกไซด์บวก (positive ion) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์และเคลื่อนที่ไปหาแคโทด ตัวอย่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



2. Reduction reaction หรือ Cathodic reaction เกิดที่ขั้วแคโทด ตัวอย่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

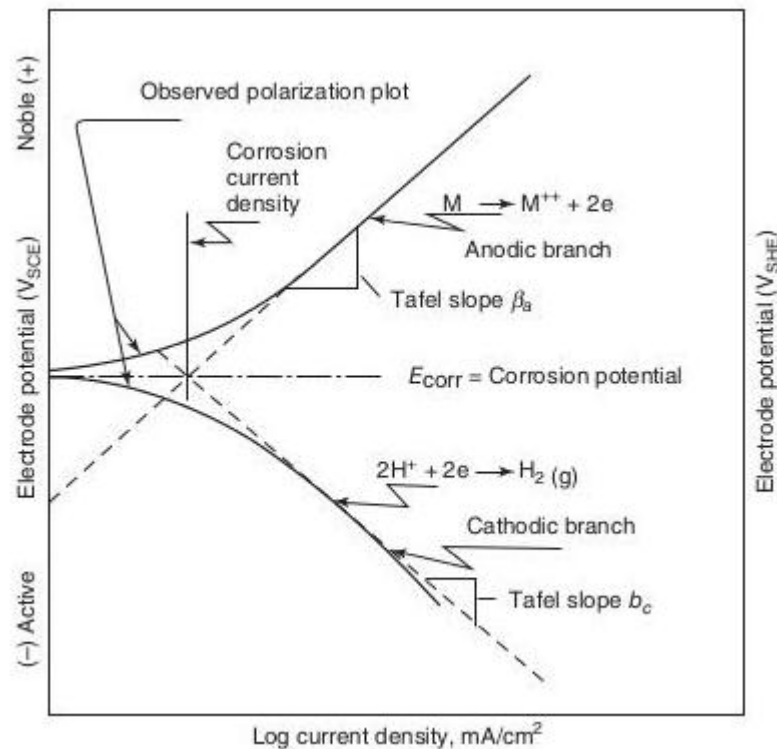


ปฏิกิริยานี้มีการเกิดขึ้นในน้ำที่เป็นกรดมากๆ ไฮโดรเจนอ็อกไซด์ที่มีอยู่ในน้ำหรือกรดจะทำปฏิกิริยารวมตัวเป็นแก๊ส ซึ่งโมเลกุลแก๊สที่เกิดขึ้นอาจจะเกาะตัวอยู่ในบริเวณแคโทดทำให้อ็อกไซด์อื่นๆไม่สามารถเคลื่อนที่ไปรับอิเล็กตรอนได้อีก จึงเป็นผลให้ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าหยุดชะงักลง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Polarization รูปที่ 2.17 เป็นการแสดงตัวอย่างสำหรับปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวโลหะ โดยการเกิดปฏิกิริยาทั้ง anodic และ cathodic



รูปที่ 2.17 กระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นที่ผิวโลหะจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า [11]

ไดอะแกรมที่แสดงถึงกระบวนการกัดกร่อนโดยอาศัยองค์ประกอบของ anodic current และ cathodic current แสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งแกนตั้งจะแทนด้วยศักย์ไฟฟ้า ส่วนแกนนอนแทนด้วย logarithm current ที่เกิดการกัดกร่อน กระแสตามทฤษฎีสำหรับปฏิกิริยา anodic และ cathodic ถูกแสดงด้วยเส้นตรง เส้นโค้งที่เกิดขึ้นในไดอะแกรมเป็นเส้นโค้งที่แสดงกระแสรวมของกระแส anodic และ cathodic สำหรับบริเวณจุดแหลมของเส้นโค้งเป็นจุดที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสจากกระแส anodic เป็น cathodic หรือจากกระแส cathodic เป็น anodic



รูปที่ 2.18 Tafel polarization diagram แสดงเส้นกระแส anodic และ cathodic [12]

2.9.1 ชนิดของเซลล์การกัดกร่อนเคมีไฟฟ้า

ขั้วแอโนดและแคโทดที่เกิดขึ้นอาจจะอยู่ติดๆกันหรือห่างกันมากๆในโลหะชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ ลักษณะของเซลล์ที่เกิดขึ้นได้แก่

1. Galvanic cell หรือ Two-metal cell ขั้วแอโนดและแคโทดเป็นโลหะต่างชนิดกัน โลหะที่มี Electrode potential ต่ำจะเป็นแอโนดและจะผุกร่อนไป ปริมาณการผุกร่อนเป็นอัตราส่วนกับปริมาณของกระแสที่ไหลและน้ำหนักระยะของธาตุ (Faraday's Law)

2. Single-metal cell กรณีนี้แม้ว่าจะมีโลหะเพียงชนิดเดียวแต่อาจเกิดแอโนดและแคโทดขึ้นได้ เพราะโลหะที่ใช้ในอุตสาหกรรมมักจะไม่ใช่โลหะบริสุทธิ์ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากโลหะบริสุทธิ์มีราคาแพงเกินไป หรือมีความแข็งแรงน้อยกว่าโลหะผสม ตัวอย่างเช่น เหล็กอาจมีโครงสร้างคาร์ไบด์หรือโครงสร้างต่างๆปะปนอยู่ หรือแม้แต่ในเนื้อโลหะที่บริสุทธิ์เองที่บริเวณขอบเกรนอาจมีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่ไม่สมบูรณ์เกิดเป็น Dislocations ต่างๆ ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันในเนื้อโลหะเหล่านี้อาจทำให้เกิดขั้วของการกัดกร่อนขึ้นได้โดยแอโนดจะเกิดขึ้นตรงบริเวณขอบเกรน

3. Concentration cell แม้ในเนื้อโลหะที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) จริงๆ การผุกร่อนก็อาจจะเกิดขึ้นได้ เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ที่สัมผัสกับโลหะมีความเข้มข้นแตกต่างกัน

4. Oxygen-concentration cell จะเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของออกซิเจนเข้มข้นบนผิวของโลหะที่ขึ้นที่สามารถเกิดออกซิไดซ์ได้ ซึ่ง oxygen-concentration cell จะเป็นการรุกร่อนที่สำคัญสำหรับโลหะที่เกิดออกซิไดซ์ได้ง่าย เช่น เหล็กที่ไม่มีการสร้างฟิล์มที่ป้องกันการเกิดออกไซด์

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lee, Jung, Sung, Kim, Lee, Park, Shin, Lee [13] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนแบบหลุมต่อสมบัติการแตกร้าวในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ที่ความหนา 12 มิลลิเมตร โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่า Cr_{eq}/Ni_{eq} ที่แตกต่างกัน ในการศึกษาใช้กระบวนการเชื่อมทดสอบด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ชนิด AWS A5.22 E308LT0-1/4 โดยการปรับสัดส่วนของโครเมียมและนิกเกิลในฟลักซ์ ค่า Cr_{eq}/Ni_{eq} ที่ได้มาจากการคำนวณด้วยสมการของเซฟเลอร์ ชิ้นงานรอยเชื่อมถูกทดสอบภายใต้สถานะสารละลาย 0.1 M NaCl ที่อุณหภูมิปกติ จากการทดลองพบว่ารอยเชื่อมที่มีค่า Cr_{eq}/Ni_{eq} ต่ำสุดมีโครงสร้างแบบออสเทนไนต์ทั้งหมดจะเกิดรอยแตกและมีการกัดกร่อนหนาแน่นที่สุด

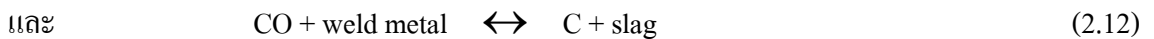
Kim, Kim, Sung, Kim, Ko, Kang, Hong, Park, Lee [14] ได้ทำการศึกษาการกัดกร่อนแบบหลุมของรอยเชื่อม 316L ตามการจำแนกอัตรา Cr_{eq}/Ni_{eq} ออกเป็นสามค่าของลวดเชื่อมในกลุ่มไส้ฟลักซ์ โดยแต่ละรอยเชื่อมมีเคลด้าเฟอร์ไรต์ไม่น้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทำการทดสอบแบบแอโนดโพลาไรเซชันในสารละลาย 0.1M NaCl ที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 45 นาที พบว่ารอยเชื่อมที่มีค่าโครเมียมสูงสุดจะมีค่า pitting potential ($0.39V_{SCE}$) สูงสุด ส่วนรอยเชื่อมที่มีปริมาณโครเมียมต่ำสุดจะให้ผลด้านการกัดกร่อนที่ไม่ดี

Martorano, Padiha, Tavares [15] ได้ทำการศึกษาการก่อตัวของเคลด้าเฟอร์ไรต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกด้วยกระบวนการหล่อ โดยการปรับตัวแปรออกเป็นสองส่วนคือส่วนผสมทางเคมี และอัตราการเย็นตัว ทำการทดสอบปริมาณเฟอร์ไรต์ด้วยวิธีการทางแม่เหล็กและสูตรคำนวณ ในการทดสอบพบว่าการก่อตัวหรือการกระจายตัวของเคลด้าเฟอร์ไรต์ได้รับอิทธิพลอย่างมากต่อส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ ในขณะที่อัตราการเย็นตัวมีผลต่อการกระจายตัวของเคลด้าเฟอร์ไรต์น้อย

Hsieh, Wu [7] ได้ทำการศึกษากลไกการตกผลึกและลักษณะพื้นฐานของเฟสซิกม่าที่เกิดขึ้นในเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าเฟสซิกม่าที่เกิดขึ้นมีการแยกตัวที่จุลยวดยุตออกจากเคลด้าเฟอร์ไรต์เป็นเฟสซิกม่าและออสเทนไนต์ การตกผลึกมีทั้งบริเวณขอบเกรนสัมผัสของเคลด้าเฟอร์ไรต์กับออสเทนไนต์ บริเวณจุดสัมผัสของขอบเกรนเคลด้าเฟอร์ไรต์ เป็นต้น การตกผลึกของเฟสซิกม่ามีผลต่อการลดลงของสมบัติของเหล็กทั้งสมบัติเชิงกลที่เกี่ยวข้องกับค่าความเหนียว และสมบัติด้านความต้านทานการ

กักร่อน นอกจากนี้ยังได้แสดงแนวทางการทำนายการเกิดเฟสซิกม่าในเหล็กกล้าไร้สนิมด้วย ซึ่งการเกิดเฟสซิกม่าถือเป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิม

Rao [16] ได้ทำการสรุปผลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปกคลุมรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมในกระบวนการเชื่อม GMAW จากบทความเรื่อง “Carbon Pickup from Argon-CO₂ Blends in GMAW” พบว่าปริมาณธาตุคาร์บอนที่ตกค้างในรอยเชื่อมเป็นสัดส่วนกับรากที่สองของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผสมในแก๊สปกคลุม โดยอาศัย Ellingham - Richardson's diagram เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ พบว่าที่อุณหภูมิการเชื่อมประมาณ 1600°C แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีความเสถียร ยกเว้นในกรณีที่มีธาตุผสมอลูมิเนียม โครเมียม แมงกานีส ซิลิกอน หรือไททาเนียม เป็นต้น ซึ่งออกไซด์ของธาตุเหล่านี้จะมีความเสถียรมากกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากข้อสันนิษฐานของปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สปกคลุมรอยเชื่อมกับบ่อรอยเชื่อมหลอมเหลวจะส่งผลให้เกิดแก๊ส 2 ชนิด คือ CO และ SiO โดยที่อุณหภูมิ 1600°C ค่า Standard free energy (ΔG) มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากปฏิกิริยาการรวมตัวของออกซิเจนกับคาร์บอนและซิลิกอนจนเกิดแก๊ส CO₂, SiO และ CO ที่ -95, -120 และ -138 kcal ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในระหว่างปฏิกิริยาการเกิดออกไซด์นั้นแก๊ส SiO และ CO ได้ก่อตัวขึ้นที่บริเวณบ่อรอยเชื่อม ซึ่งสามารถพิจารณาได้ตามสมการต่อไปนี้



จากสมการที่ (2.11),

$$K = \frac{p_{\text{CO}} \times p_{\text{SiO}}}{a_{\text{Si}} \times p_{\text{CO}_2}} \quad (2.13)$$

$$K' = K \times a_{\text{Si}} = \frac{p_{\text{CO}} \times p_{\text{SiO}}}{p_{\text{CO}_2}} \quad (2.14)$$

เมื่อกำหนดให้ $p_{\text{CO}} = p_{\text{SiO}}$,
$$K' = \frac{p_{\text{CO}}^2}{p_{\text{CO}_2}} \quad (2.15)$$

หรือ
$$p_{\text{CO}}^2 \propto p_{\text{CO}_2} \quad (2.16)$$

$$p_{\text{CO}} \propto \sqrt{p_{\text{CO}_2}} \quad (2.17)$$

ดังนั้น
$$p\text{CO} \propto \sqrt{\%\text{CO}_2} \quad (2.18)$$

เมื่อ $\%\text{CO}_2$ คือปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการปกคลุมรอยเชื่อม
จากสมการ (2.12),
$$C \propto p\text{CO} \quad (2.19)$$

เมื่อ $C = \%\text{C}$ ในรอยเชื่อม ดังนั้นจากสมการ (2.16) และ (2.17) จะได้

$$\%\text{C} \propto p\text{CO} \propto \sqrt{\%\text{CO}_2} \quad (2.20)$$

ดังนั้นปริมาณคาร์บอนอิสระของรอยเชื่อมจึงมาจากรากที่สองของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการปกคลุมรอยเชื่อม