สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [1]

2.11 เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 เกรด คือ เกรดทั่วไป (general grade) และเกรดพิเศษ (super grade) ซึ่งจะมีส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์โดยทั่วไป

เกรด	ส่วนผสม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)			
	Cr %	Ni %	Mo %	N %
ทั่วไป	~ 22-25	~3-4	~2	~0.1-0.2
พิเศษ	~25-27	~7-8	~3	~0.2-0.3

ส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมจะถูกปรับเพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาคเป็น 50 % เฟร์ไรต์ และ 50 % ออสเทไนต์โดยประมาณ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกลและความต้านทานการกัดกร่อน และนอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ให้มีความต้านทานการกัดกร่อนและมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นโดยการผสมธาตุผสมต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

จากตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มีค่าความเค้นครากและค่าความต้านทานแรงดึงสูง และยังคงมีค่าความยืดตัวที่ดี ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของโลหะผสมสองเฟส โดยที่เฟสเฟร์ไรต์จะเป็นเฟสที่ให้ความแข็งแรงสูง ส่วนเฟสออสเทไนต์จะเป็นเฟสที่ให้ค่าความเหนียวและความแกร่งสูง และจากการเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.4 ซึ่งแสดงคุณสมบัติกลที่เปลี่ยนไปตามปริมาณเฟร์ไรต์ เมื่อมีปริมาณเฟร์ไรต์มากขึ้น ค่าความเค้นครากและค่าต้านทานแรงดึงสูงสุดจะเพิ่มมากขึ้น แต่ค่าความแกร่งและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวจะลดลง

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่กำลังพัฒนาให้มีความต้านทานการกัดกร่อนและมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น [1]

ส่วนผสมเคมี							การนำไปใช้งาน
N	Ni	Cr	Mo	Cu	Mn	Si	
0.10	4	23	0.2	1.5	1.5	0.5	เพิ่มความสามารถในการกลึง กัด ไสและความแข็งแรง
0.4	2.5	22	2.2	-	7	0.5	นิกเกิลต่ำ ทำให้โครงสร้างเสถียรในบริเวณกระทบร้อน
0.3	6.5	25	4	1.4	1.5	0.5	โมลิบดินัมและไนโตรเจนสูง เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน
0.3	7	27	3.5	1.4	1.5	0.5	โครเมียมและไนโตรเจนสูง เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน
0.15	5	22	0-2	-	1.5	2-4	ซิลิกอนสูง เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนและการขัดถู

2.1.2 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรดทั่วๆไปแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์โดยทั่วไป [1]

เกรด	ความเค้นคราก (0.2YS) (MPa)	ความต้านแรงดึงสูงสุด (UTS) (MPa)	ความยืด (El %)	ความแกร่ง (KCV) (daJ/cm^2)	อุณหภูมิ T (^oC)	% เฟร์ไรต์ (%α)
Z3 CND 23-4 Az	>400	>600	>25	>140	980	≈ 50
Z3 CND 22-5 Az	>480	>680	>25	>140	1040	≈ 50
Z3 CNDU 25-7 Az	>540	>740	>25	>100	1080	≈ 50

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติที่เปลี่ยนไปตามปริมาณเฟร์ไรต์ [1]

เกรด	% เฟร์ไรต์ [%α]	ความเค้นคราก 0.2%YS (MPa)	ความต้านแรงดึงสูงสุด UTS (Mpa)	ความยืด El%	ความแกร่ง KCV (J/ cm^2)
ZCN18-10 (AISI304L)	0	220	590	50	200
Z3 CNDU 21-8	6.5	350	670	35	180
Z5 CNDU 26-6	80	800	850	20	100

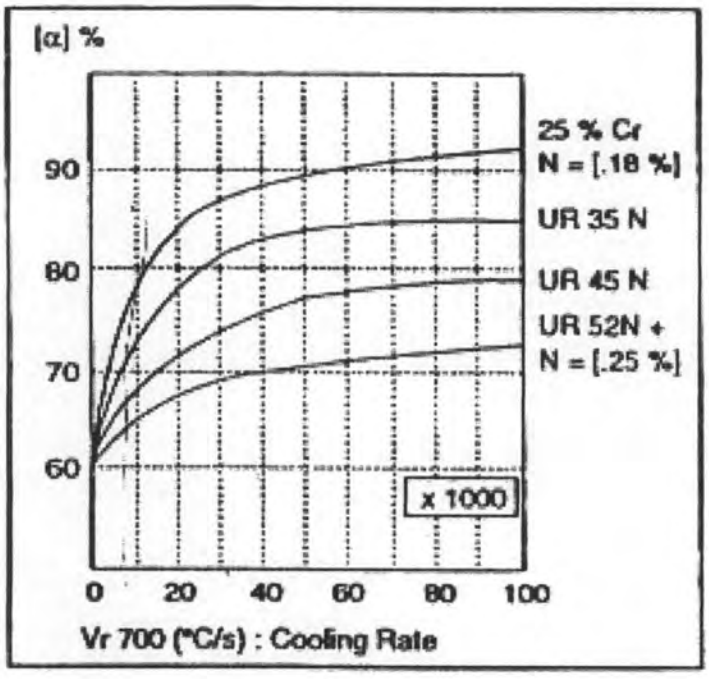
2.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในบริเวณกระทบร้อนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

มีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

1. การเพิ่มปริมาณของเดลตาเฟร์ไรต์จากการที่มีอัตาการเย็นตัว (cooling rate) สูง เพราะบริเวณกระทบร้อนมีอัตราการเย็นตัวสูงเกินไป จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากเดลตาเฟร์ไรต์ไปเป็นออสเทไนต์ได้น้อย

2. การแยกสลายของเฟร์ไรต์บางส่วนเกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (intermetallic compound) ซึ่งอาจจะเป็นการตกตะกอนของคาร์ไบด์ (carbide) หรือไนไตรด์ (nitride) โดยเฉพาะในช่วงที่มีการให้ความร้อนซ้ำ ดังนั้นจึงไม่ควรใช้พลังงานการเชื่อม (heat input) มาก

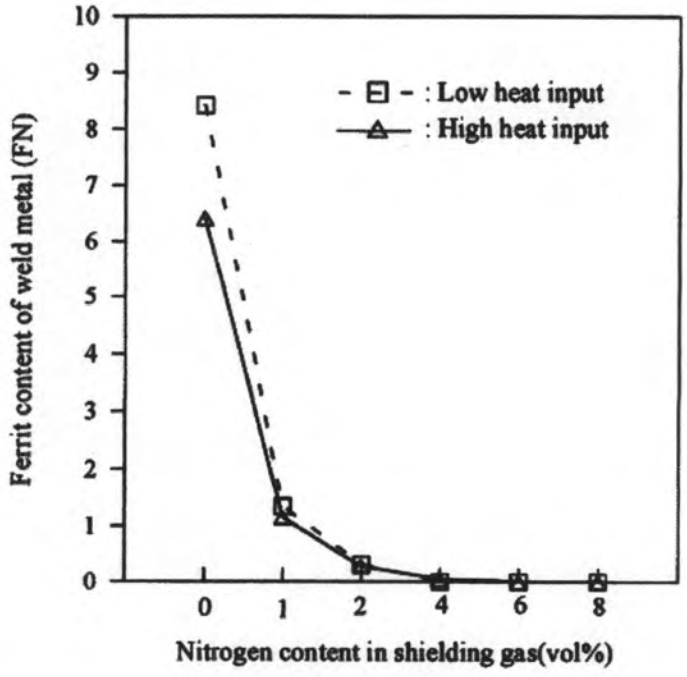
นอกจากนี้รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นผลของปริมาณไนโตรเจนที่ผสมอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ การมีปริมาณไนโตรเจนผสมอยู่สูงทำให้บริเวณกระทบร้อนมีปริมาณเดลตาเฟร์ไรต์ต่ำ เพราะไนโตรเจนจะเลื่อนอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจากออสเทไนต์เป็นเฟร์ไรต์ให้สูงขึ้น



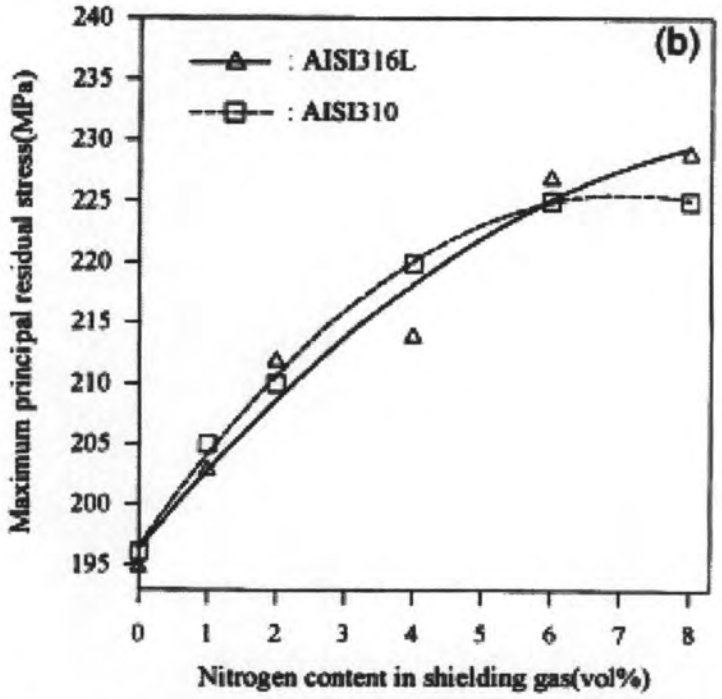
รูปที่ 2.1 ปริมาณเฟร์ไรต์สูงสุดที่บริเวณกระทบร้อนที่อัตราการเย็นตัวต่างๆ
Vr700 = อัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส [1]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Y.C. Lin, P.Y. Chen [4] ได้ศึกษาผลกระทบของแก๊สไนโตรเจนที่ปกคลุมในแก๊สอาร์กอน และปริมาณเฟร์ไรต์ต่อความเค้นตกค้างในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 316L และเกรด 310 ที่มีการผสมไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0-8 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่ใช้พลังงานการเชื่อมสูง และพลังงานการเชื่อมต่ำ พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และจากการที่อัตราเย็นตัวสูงเวลาการเย็นตัวจากออสเทไนต์เป็นเฟร์ไรต์สั้น ทำให้ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเชื่อมเพิ่มขึ้นและปริมาณเฟร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมลดลง เป็นสาเหตุให้มีความเค้นตกค้างเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างไนโตรเจนกับปริมาณเฟร์ไรต์ที่พบในแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก 316L [4]

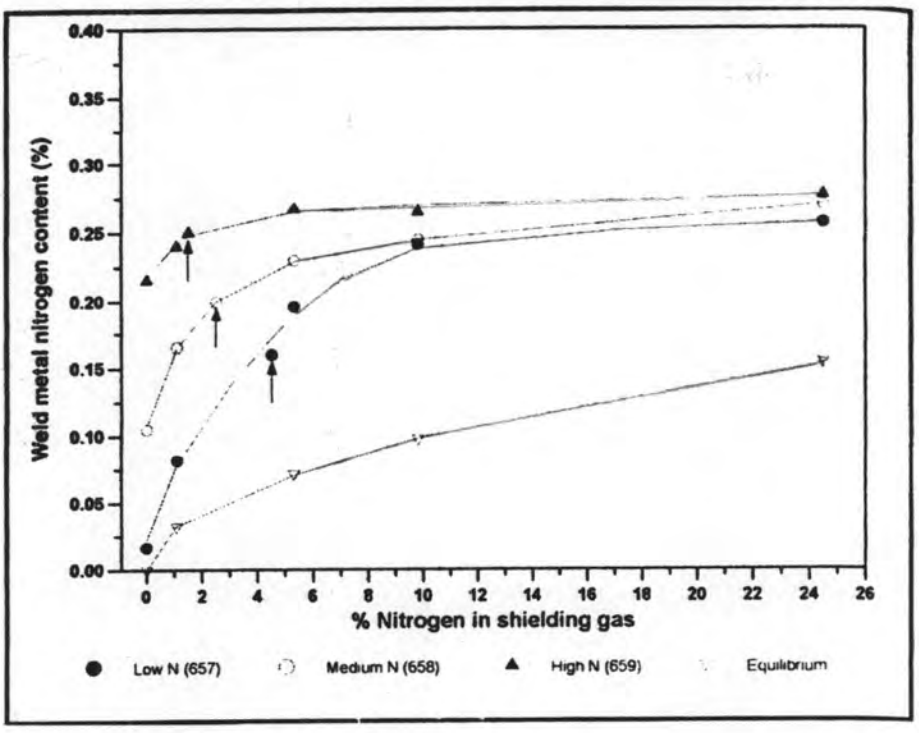


รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนกับค่าความเค้นตกค้างที่เพิ่มขึ้น [4]

M. Du toit และ P.C. Pistorius [5] ได้ศึกษาอิทธิพลของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ส่วนผสม 1.09 - 24.5 เปอร์เซนต์ไนโตรเจน ในการเชื่อมทิกพัลส์เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 310 ที่มีไนโตรเจนผสมอยู่ดังตารางที่ 2.5 จากการสำรวจพบว่าเมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนเพิ่มถึงช่วงหนึ่งการละลายไนโตรเจนในเนื้อเชื่อมจะคงที่ ตามขีดจำกัดการละลาย (solubility limit) ของไนโตรเจน ซึ่งมีผลจากปริมาณไนโตรเจนในเนื้อพื้นด้วย และทำให้ปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนต่ำลงดังรูปที่ 2.4

ตารางที่ 2.5 ส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 310

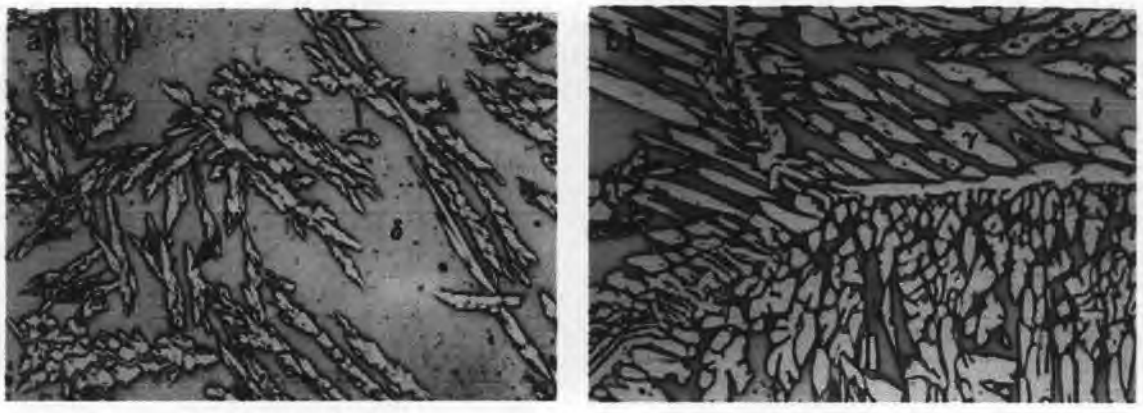
ส่วนผสมทางเคมี(เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก)								
เหล็กกล้าผสม		Cr	Ni	Mn	Si	C	S	N
VEF 657	Low N	24.4	20.1	1.91	1.60	0.075	0.023	0.005
VEF 658	Medium N	24.6	19.9	1.89	1.63	0.080	0.023	0.105
VEF 659	High N	24.3	19.9	1.93	1.63	0.085	0.022	0.240



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนและปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมของเหล็กกกล้าไร้สนิมออสเทนิติก310 [5]

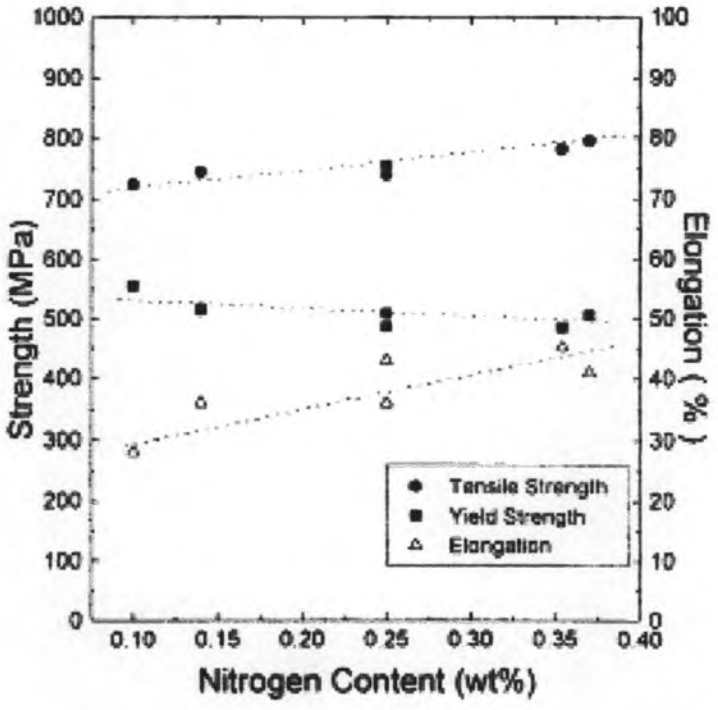
T. Ogawa, K. Zuzuki, and T. Zaizen [6] ได้ศึกษาการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่มีไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 1 ถึง 25 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร พบว่าปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเชื่อมเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเชื่อมแก๊สอาร์กอนโดยไม่ผสมไนโตรเจนพบว่าปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเชื่อมจะลดลงจาก 0.345 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักเป็น 0.27 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และจาก 0.250 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักเป็น 0.17 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ดังนั้นในการเชื่อมอาร์คควรจะพิจารณาโลหะผสมที่เปลี่ยนแปลงความสามารถในการละลายของไนโตรเจน เช่น Ti, Zr, Nb, V, Cr, Co, Mo และ Mn ซึ่งเป็นธาตุที่มีคุณสมบัติเฉพาะที่จะรวมตัว (affinity) กับไนโตรเจนได้ดีจะเพิ่มความสามารถการละลายของไนโตรเจน

Young-Hwan, Zin-Hyoung Lee [7] ได้ศึกษาผลของไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ต่อคุณสมบัติกลและโครงสร้างจุลภาค พบว่าเมื่อมีปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 0.14 เป็น 0.38 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณสัดส่วนเชิงปริมาตรของเฟร์ไรต์ลดลงจาก 62 เป็น 31 เปอร์เซ็นต์ และการแข็งตัวเปลี่ยนจากเฟสเฟร์ไรต์เฟสเดียวไปเป็นเฟร์ไรต์-ออสเทไนต์ดังรูปที่ 2.5 เฟสออสเทไนต์จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มของปริมาณไนโตรเจนด้วยกลไกการละลายของแข็งแบบแทรกที่ (solid-solution strengthening) ทำให้ค่าความต้านแรงดึงกับเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้น แต่ค่าความเค้นแรงดึงที่จุดคราก็ลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.6



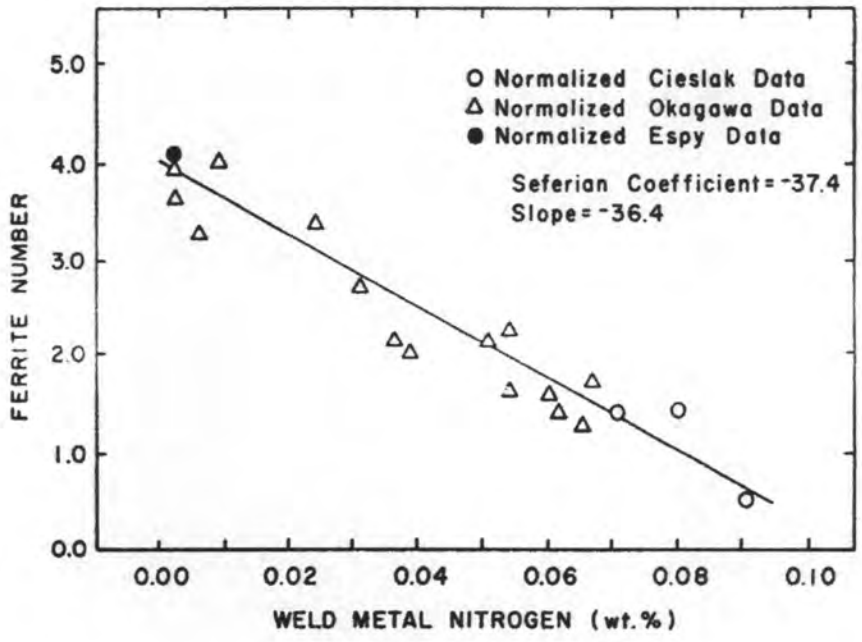
ก. 0.14 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ข. 0.25 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

รูปที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก 25Cr-7Ni-1.5Mo-xN ภายหลังการหล่อ [7]



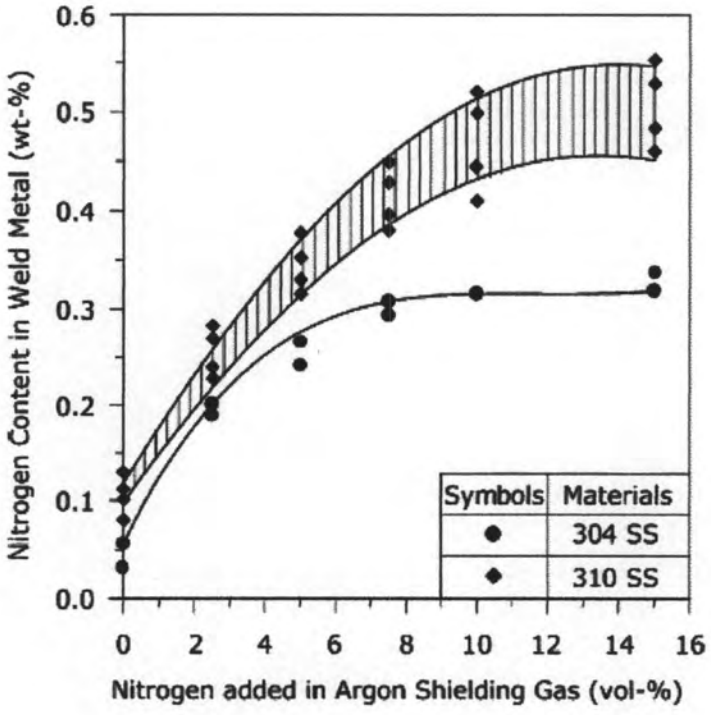
รูปที่ 2.6 ผลของไนโตรเจนต่อค่าความเค้นแรงดึงที่จุดคราก เปอร์เซ็นต์การยืดตัว และค่าความต้านทานแรงดึง [7]

จากการศึกษาของ R.K. Okagawa, R.D. Dixon และ D.L. Olson [8] เกี่ยวกับอิทธิพลของไนโตรเจนที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 304L โดยวิธีการเชื่อมทิกพัลส์ ใช้แก๊สปกคลุมไนโตรเจนผสมอาร์กอน มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจน 0 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าเมื่อใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนบริสุทธิ์ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะเท่ากับโลหะพื้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนทำให้ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการลดปริมาณเดลตาเฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม คณะผู้วิจัยสรุปว่า แก๊สปกคลุมอาร์กอนที่ผสมไนโตรเจน 0 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติต่อเนื้อโลหะรอยเชื่อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะการกระจายตัวและปริมาณของเดลตาเฟร์ไรต์

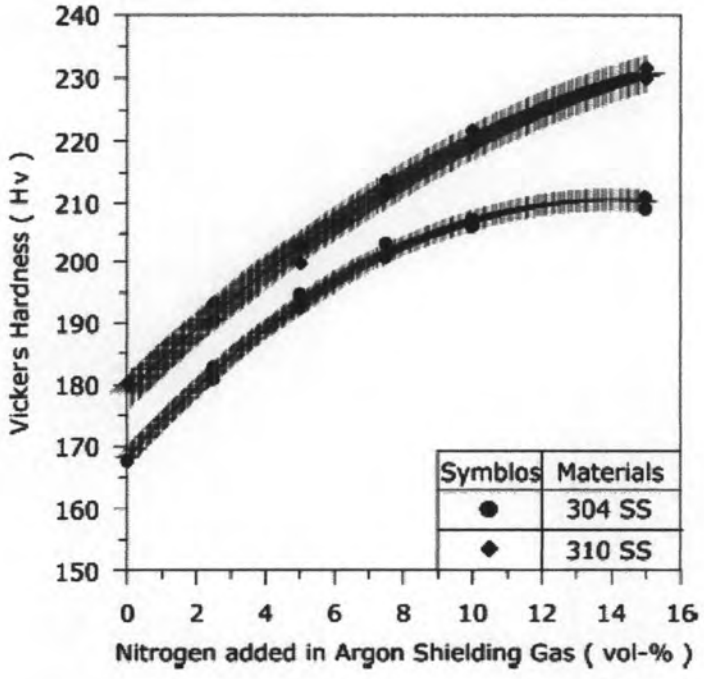


รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของปริมาณเดลตาเฟร์ไรต์กับปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก [8]

K.H. Tseng, C.P. Chou [9] ได้ศึกษาผลของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 304 และ 310 ที่อัตราส่วน 2.5-15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรพบว่าจำนวนของไนโตรเจนในแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของแก๊สไนโตรเจนที่ผสมในอาร์กอน โดยจะพบว่าปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 310 จะมากกว่า 304 ดังรูปที่ 2.8 เพราะไนโตรเจนสามารถละลายเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของโครเมียมที่เพิ่มขึ้นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 310 มีโครเมียมมากกว่าจึงมีปริมาณไนโตรเจนมากกว่า จากการศึกษาของ Lancaster พบว่าปริมาณโครเมียมเพิ่มทำให้เพิ่มการละลายของไนโตรเจนเช่นเดียวกัน [10] และยังพบว่าเมื่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่เพิ่มขึ้น จะช่วยเพิ่มความต้านทานในการเกิดรอยร้าวของรอยเชื่อม ในกรณีที่เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีโครงสร้างออสเทไนต์ทั้งหมด เนื่องจากไนโตรเจนทำให้ขนาดเกรนออสเทไนต์ลดลง และยังพบว่าเมื่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเชื่อมเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณเดลตาเฟร์ไรต์ลดลงในเหล็ก 304 แต่เกรด 310 ไม่เปลี่ยนแปลงเพราะโครงสร้างเป็นออสเทไนต์ทั้งหมดที่อุณหภูมิห้องและที่ปริมาณไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นในแก๊สปกคลุมอาร์กอนทำให้ความแข็งเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.9 เพราะคุณสมบัติการละลายของแข็งแบบแทรกที่ (solid-solution strengthening)

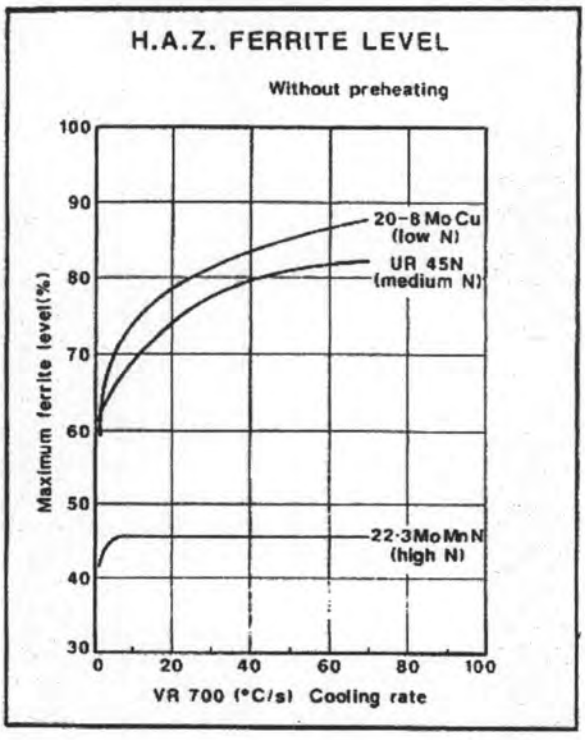


รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สอาร์กอนกับปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเชื่อม [9]



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในแก๊สคลุมอาร์กอนกับคุณสมบัติความแข็ง [9]

B. Bonnefois, P. Soulignac และ D. Catelin [11] ได้รวบรวมประโยชน์ของไนโตรเจนในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมไว้คือเมื่อเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในโลหะพื้น แนวการหลอมเหลวและบริเวณกระทบร้อนมีปริมาณเดลตาเฟร์ไรต์ที่สูงกว่าเดิม แม้ว่าจะใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมเดียวกันกับโลหะพื้น การเพิ่มขึ้นของเดลตาเฟร์ไรต์เป็นผลมาจากอุณหภูมิของการเชื่อมที่มีอัตราการเย็นตัวที่สูง ในการทดลองหาผลของไนโตรเจนต่อการเพิ่มปริมาณเฟร์ไรต์ในบริเวณกระทบร้อนนั้น ได้ใช้เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ไม่มีไนโตรเจนผสมเกรด 20-8 Mo Cu และเกรดใหม่ 22-3 Mo Mn N ที่มีปริมาณของไนโตรเจนอยู่สูง ซึ่งทั้ง 2 กรณีเมื่อพล็อตค่าปริมาณเฟร์ไรต์สูงสุดก็จะพบว่าเป็นความสัมพันธ์กับอัตราการเย็นตัว เมื่อเย็นตัวลงในอัตราการเย็นตัวที่เท่ากันเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีปริมาณไนโตรเจนผสมสูงจะมีจะมีปริมาณเดลตาเฟร์ไรต์ที่บริเวณกระทบร้อนต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีปริมาณไนโตรเจนต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ปริมาณเฟร์ไรต์ในบริเวณกระทบร้อน ที่อัตราการเย็นตัวต่างๆ
Vr700 = อัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

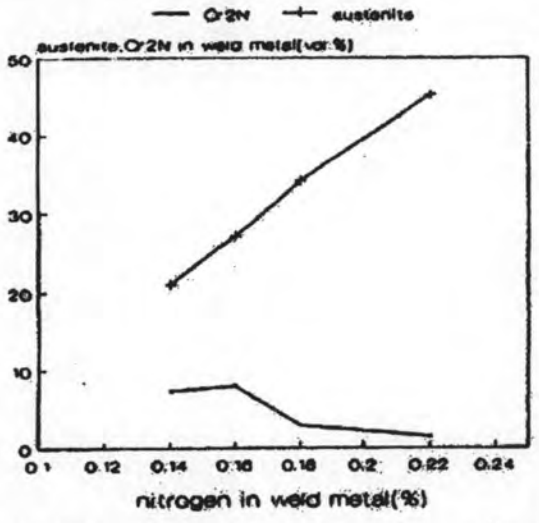
G. Huismann และ H. Hoffmeister [12] ได้ทดลองเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมเคมีดังตารางที่ 2.5 ด้วยเทคนิคการเชื่อมทิกพัลส์

ตารางที่ 2.5 ส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ใช้ในการทดลองของ G. Huismann และ H. Hoffmeister [12]

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%N	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu
0.02	0.44	1.48	0.026	0.001	0.16	21.7	6.3	3.1	0.15

ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้แก๊สปกคลุมรอยเชื่อมที่มีส่วนผสม 70%He 30%Ar รอยเชื่อมจะมีปริมาณไนโตรเจนละลายเพียง 0.15% และในโลหะพื้นละลายเพียง 0.14% เมื่อเพิ่มไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมรอยเชื่อม โดยควบคุมความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนให้อยู่ที่ 7.5 มิลลิบาร์ ทำให้โลหะพื้นและรอยเชื่อมมีไนโตรเจนละลายอยู่ 0.16% เท่ากับชิ้นงานก่อนเชื่อม และเมื่อให้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ความดัน 15 และ 30 มิลลิบาร์ รอยเชื่อมมีไนโตรเจนละลายเพิ่มขึ้นเป็น 0.18% และ 0.20-0.22% ตามลำดับ

นอกจากนี้ปริมาณออสเทไนต์ในรอยเชื่อมจะสัมพันธ์กับปริมาณไนโตรเจนที่ละลายอยู่ การใช้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ 30 มิลลิบาร์ จะทำให้มีปริมาณของไนโตรเจนละลายอยู่ในรอยเชื่อม 0.20-0.22% และมีปริมาณออสเทไนต์ในรอยเชื่อม 40-60%



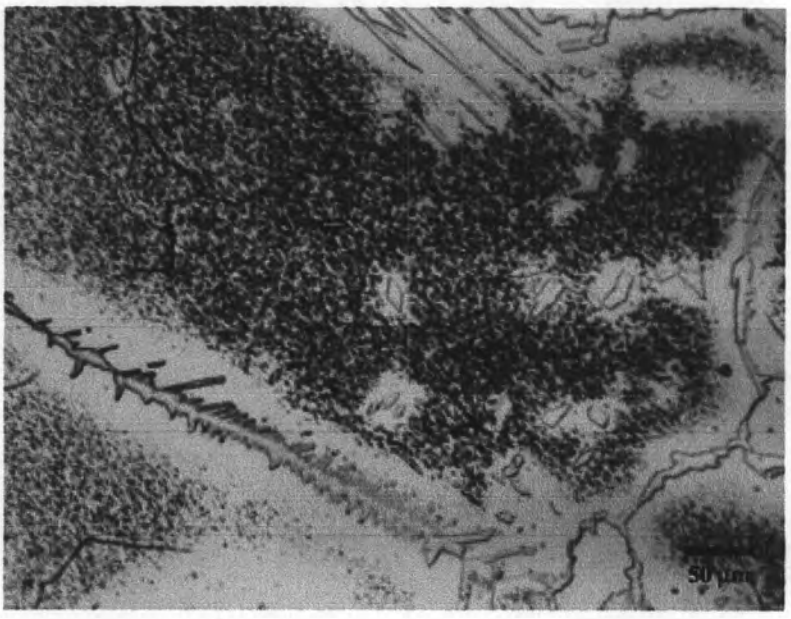
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อมกับปริมาณโครเมียมไนไตรด์และปริมาณออสเทไนต์ที่พบ [12]

ในรอยเชื่อมและบริเวณกระทบร้อนพบการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ โดยปริมาณของโครเมียมไนไตรด์จะลดลงเมื่อในรอยเชื่อมมีปริมาณไนโตรเจนละลายอยู่มากขึ้น รูปที่ 2.11 แสดงผลของปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อมต่อปริมาณโครงสร้างออสเทไนต์และปริมาณโครเมียมไนไตรด์ที่พบในรอยเชื่อม

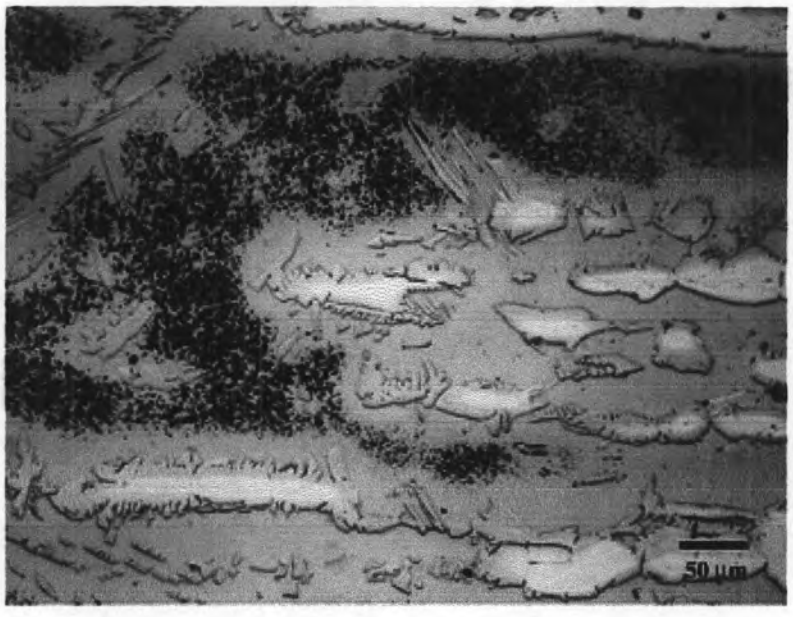
Heon Young Ha, Hyuk Sang Kwon [13] ได้ศึกษาผลกระทบของไนโตรเจนในพฤติกรรมการตกผลึกของ Cr_2N กับอิทธิพลของการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมผสมไนโตรเจนสูง (Fe-18Cr-20Mn-3Mo-(0.87,1.07)N) พบว่า เมื่อทำการบ่มแข็งที่ 900 องศาเซลเซียส เกิดการตกผลึกของ Cr_2N ที่ขอบเกรน (grain boundary) ต่อมาเกิดภายในเกรน และสุดท้ายจะพบการเกิดโครงสร้างแบบลาเมลา (lamellar) เพราะว่าไนโตรเจนผสมอยู่สูงจะสามารถรวมตัวกับธาตุเป็นสารประกอบไนไตรด์ได้ดี คณะผู้วิจัยพบว่าการต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มลดลงอย่างมากเนื่องจากโครงสร้างไนไตรด์แบบลาเมลาทำให้เกิดการขาดโครเมียม (localized chromium depleted zone) ใกล้ ๆ กับสารประกอบไนไตรด์

T.A. Palmer, J.W. Elmer, S.S. babu [14] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟร์ไรต์ออสเทไนต์ในบริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ 2205 (Fe-22.43Cr-4.88Ni-3.13Mo-0.004N) โดยใช้การเชื่อมแบบจุดพบว่ามีการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ภายในเกรนเดลตาเฟร์ไรต์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1150-1375 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.12 เนื่องจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วและเกิดการละลายไนโตรเจนอิ่มตัวแต่เมื่อเพิ่มปริมาณไนโตรเจนสูงเวลาการเปลี่ยนจากเฟไรต์เป็นออสเทไนต์เร็วขึ้นทำให้ไม่พบการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์

T.H. Chen, J.R. Yang [15] ได้สำรวจโครงสร้างจุลภาคในบริเวณกระทบร้อนจากการจำลองการเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด 2205 ที่มีไนโตรเจนผสมอยู่ โดยที่ใช้พลังงานความร้อนเป็นรอบ (thermal cycle) ที่ 5 kJ/cm. และให้ความร้อนที่ 700 องศาเซลเซียส ไนโตรเจนผสมในอาร์กอน 0.4-5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเกิดการแพร่ของไนโตรเจนอะตอมระหว่างเฟสเดลตาเฟร์ไรต์กับออสเทไนต์ เนื่องจากความสามารถในการละลายของไนโตรเจนในออสเทไนต์และไนโตรเจนอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturation of nitrogen) จะเกิดที่เฟสเดลตาเฟร์ไรต์ถ้าเวลาการเปลี่ยนรูปไปเป็นออสเทไนต์ไม่เพียงพอ ทำให้เกิดการตกผลึกของโครเมียมไนไตรด์ในบริเวณกระทบร้อนภายในเฟสเดลตาเฟไรต์ขนาดประมาณ 0.5-1 ไมโครเมตร ที่คงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 5 นาทีดังแสดงในรูปที่ 2.13 และเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นเป็น 10 นาทีการตกผลึกจะพบมากที่ขอบของเกรนย่อยในเฟสเดลตาเฟร์ไรต์ดังแสดงในรูปที่ 2.14

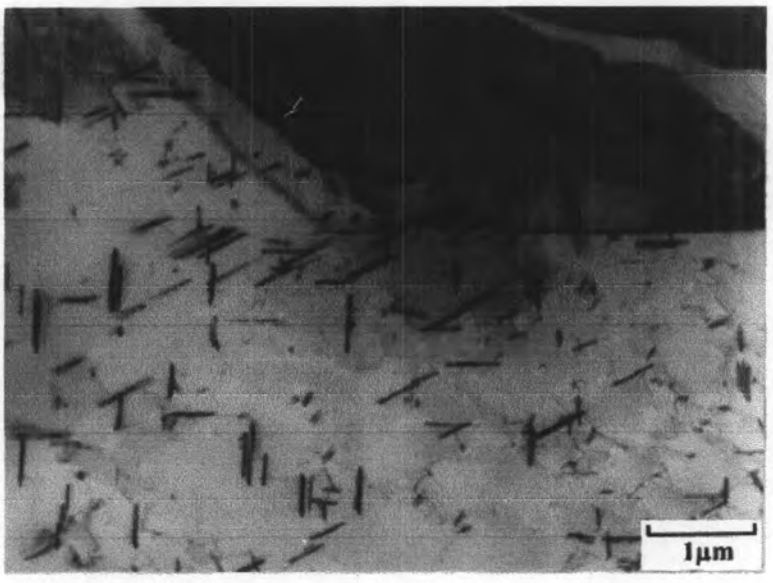


ก.17 วินาที อุณหภูมิ 1375 องศาเซลเซียส

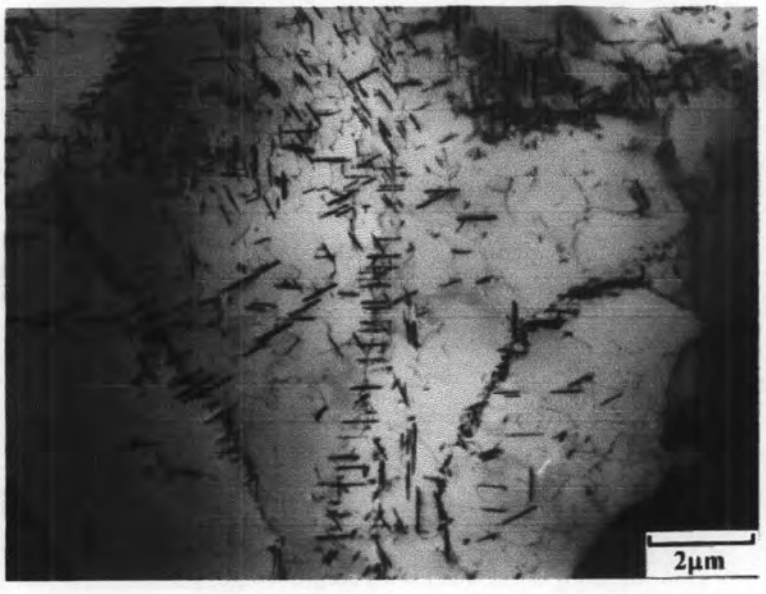


ข. 20 วินาที 1150 องศาเซลเซียส [14]

รูปที่ 2.12 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนที่ใช้เวลาการอาร์ค



รูปที่ 2.13 การตกตะกอนโครเมียมไนไตรด์ภายในเดลตาเฟร์ไรต์ ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงโครงสร้างจุลภาคของ (700 องศา 5 นาที) [15]

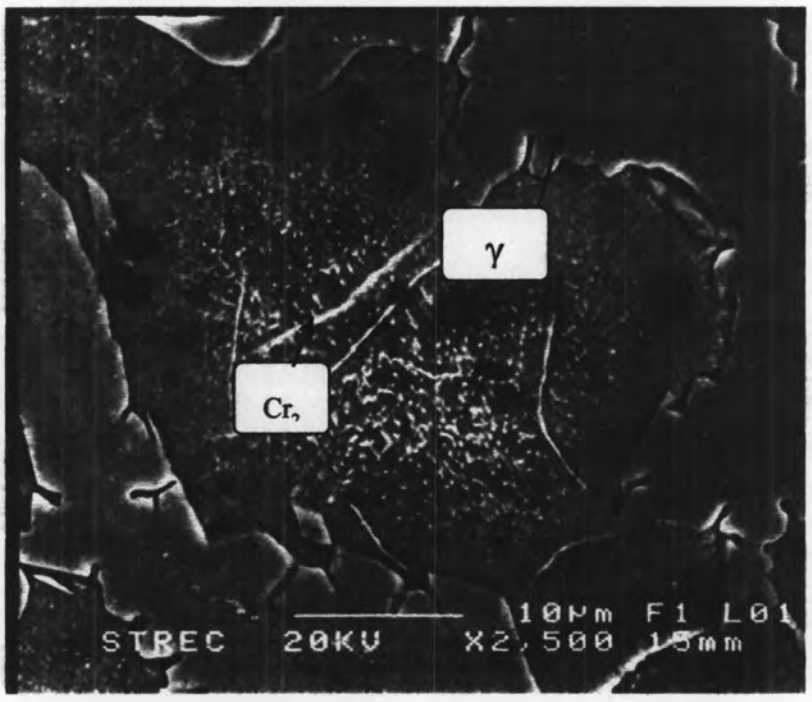


รูปที่ 2.14 การตกตะกอนโครเมียมไนไตรด์ภายในเดลตาเฟร์ไรต์ ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงโครงสร้างจุลภาคของ (700 องศา 10 นาที) [15]

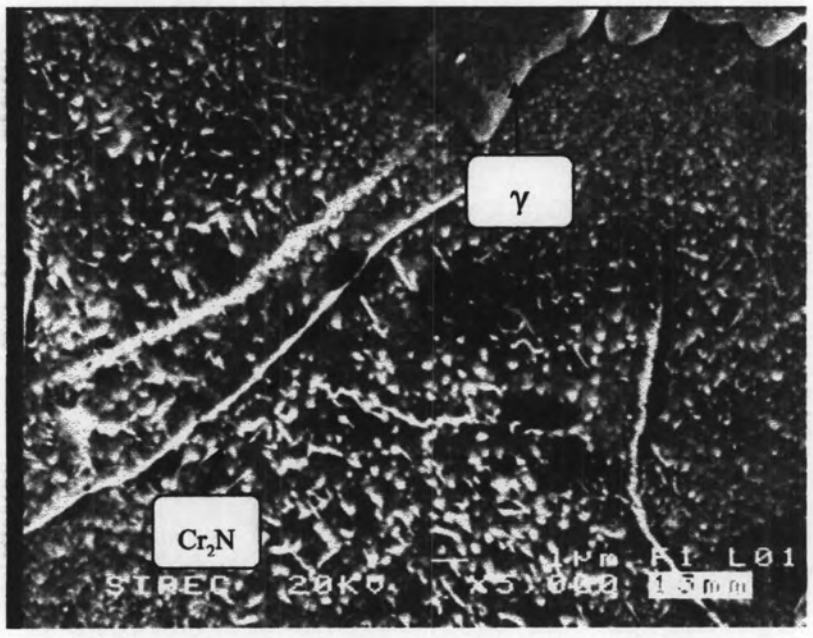
โมษิต วงศ์ปิ่นแก้ว [3] ศึกษาผลของปริมาณไนโตรเจนต่อปริมาณโครงสร้างเฟร์ไรต์และความต้านทานการกัดกร่อนของแนวเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28% นิกเกิล 7% พบว่าที่บริเวณแนวการหลอมเหลวของชิ้นงาน K3 (0.2300 wt.%N) K4 (0.3400 wt.%N) และ ซึ่งพบว่าที่บริเวณใจกลางเฟร์ไรต์มีการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์เกิดขึ้น โดยในเหล็ก K3 ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจน 0.2300 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์หนาแน่นกว่าเหล็ก K4 ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจน 0.3400 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

การที่เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนต่ำกว่าเกิดการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์มากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่า Horng-Yih Liou [16] และคณะได้อธิบายว่า เมื่อให้ความร้อนแก่เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 1350 องศาเซลเซียส) ออสเทไนต์จะเปลี่ยนแปลงเป็นเดลตาเฟร์ไรต์ และเมื่อเดลตาเฟร์ไรต์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเย็นตัวลง เดลตาเฟร์ไรต์จะเปลี่ยนแปลงกลับไปเป็นออสเทไนต์ เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีปริมาณไนโตรเจนต่ำกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนเดลตาเฟร์ไรต์เป็นออสเทไนต์จะต่ำกว่าเหล็กที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่าดังนั้นเหล็ก K3 เดลตาเฟร์ไรต์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงจำนวนมากยังคงไม่เปลี่ยนแปลงกลับไปเป็นออสเทไนต์ และเพราะอัตราการเย็นตัวภายหลังการเชื่อมสูง จึงส่งผลให้บริเวณเดลตาเฟร์ไรต์ที่ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นออสเทไนต์อิ่มตัวยิ่งยวดด้วยไนโตรเจนที่บริเวณเดลตาเฟร์ไรต์จึงถูกกระตุ้นให้เกิดการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ ผลการทดลองวัดปริมาณโครเมียมไนไตรด์ในรูปที่ 2.15 และ 2.16 ยืนยันเหตุผลดังกล่าวนี้

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. กำลังขยาย 2500 เท่า



ข .กำลังขยาย 5000 เท่า

รูปที่ 2.15 การตกตะกอนโครเมียมไนไตรด์ในเหล็ก K3 ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงโครงสร้างจุลภาคของ [3]