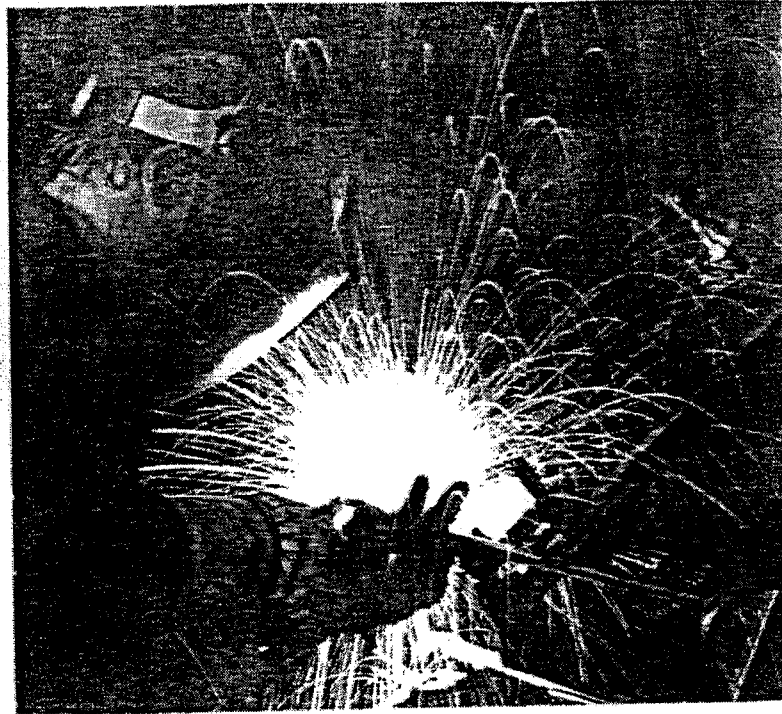


# เทคโนโลยีการเชื่อมขั้นสูง



โดย นายวิเชียร ศรีไพร  
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

## คำนำ

ในปัจจุบันการเชื่อมไฟฟ้าและการเชื่อมด้วยแก๊สนับว่ามีบทบาทมากในงานผลิตต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นทางด้านอุตสาหกรรม การก่อสร้าง การซ่อมแซมอุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องจักร การเชื่อมท่อชนิดต่างๆ เช่น ท่อเหล็ก ท่อสแตนเลสสตีล ท่อทองแดง จำเป็นอย่างยิ่งที่ช่างเชื่อมจะต้องรู้เกี่ยวกับเทคนิคการเชื่อม การเลือกใช้วัสดุและเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ฉะนั้น ในหนังสือเล่มนี้ข้าพเจ้าได้เก็บรวบรวมข้อมูลทั้งการฝึกอบรมและประสบการณ์ที่ผ่านมาตลอดทั้งหนังสืออ้างอิงจากบริษัทไทย-โกเบ เวลด์ดิ้ง จำกัด หนังสือจาก การแปลของท่านผู้รู้หลายๆ ท่าน โดยเฉพาะอาจารย์วัชรระ มีทอง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (บางมด) รวมทั้งผู้ที่มีส่วนร่วมในการจัดพิมพ์และทำต้นฉบับคือคุณอรจิรา หัตถพนม ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ถ้าหนังสือเล่มนี้มีส่วนที่อยู่บ้างก็ขออุทิศให้กับคุณบิดา มารดา ครูบาอาจารย์ ผู้มีอุปการะคุณ ตลอดทั้งเจ้ากรรมนายเวรทั้งหลาย หากมีข้อผิดพลาด ข้าพเจ้าก็ขอน้อมรับเพื่อที่จะปรับปรุงแก้ไขให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

## สารบัญ

บทที่	หน้า
1 การเชื่อมเหล็กหล่อ (Welding of cast Irons)	1
1.1 ชนิดและลักษณะที่สำคัญของเหล็กหล่อ	1
1.1.1 เหล็กหล่อเทา	3
1.1.2 เหล็กหล่อเหนียว	4
1.1.3 เหล็กหล่อขาว	5
1.1.4 เหล็กหล่ออบเหนียว	5
1.2 ความสามารถในการเชื่อมของเหล็กหล่อในการเชื่อมแบบหลอมละลาย	6
1.2.1 ปัญหาทั่วไปสำหรับความสามารถในการเชื่อม	6
1.2.2 ผลของรูปแบบกระแสไฟต์ต่อความสามารถในการเชื่อม	8
1.3 วิธีการเชื่อมแบบต่างๆ ของชิ้นงานหล่อ	8
1.3.1 การเชื่อมด้วยก๊าซออกซิอะเซทีลีน (Oxyacetylene Welding)	9
1.3.2 การเชื่อมด้วยทองเหลือง (Brazing)	9
1.3.3 การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค (Shield Metal Arc Welding)	10
1.3.4 การเชื่อมอาร์คก๊าซคลุม (Gas Metal Arc Welding)	10
1.3.5 การเชื่อมแบบอื่นๆ	10
1.4 วัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลือง (Welding Consumables)	11
1.4.1 แท่งลวดเชื่อมและฟลักซ์สำหรับการเชื่อมก๊าซออกซิอะเซทีลีน	14
1.4.2 แท่งลวดเชื่อมและฟลักซ์สำหรับการเชื่อมทองเหลือง	14
1.4.3 อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมแบบคลุมการอาร์ค	15
1.4.4 ลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมอาร์คก๊าซคลุม	16
1.5 วิธีดำเนินการเชื่อม	17
1.5.1 การเตรียมร่องเชื่อม	17
1.5.2 การเลือกกรรมวิธีการเชื่อมและวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลือง	18
1.5.3 การอุ่นงานก่อนเชื่อม	19
1.5.4 วิธีการเติมเนื้อโลหะรอยเชื่อม	22
1.5.5 กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมและการพินิจ	23
1.5.6 การใส่สลักและการใช้เหล็กเกาะยึด	25
1.5.7 การปะต่อ	27

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2	
การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมและสมบัติของรอยเชื่อมต่อ (Welding of Stainless Steel and Properties of Welded Joints)	28
2.1 การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติก	28
2.1.1 การบิตัวที่มีสาเหตุมาจากการเชื่อม	28
2.1.2 การแตกร้าวร้อน	29
2.1.3 ความต้านทานการกัดกร่อน	31
2.1.4 สมบัติทางกลของบริเวณรอยเชื่อม	31
2.2 การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมโครมิก	37
2.2.1 โครงสร้างและสมบัติของรอยเชื่อมต่อ	37
2.2.2 การป้องกันการแตกร้าวที่เนิ่นนานมา	40
2.3 การเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน	41
2.3.1 การเปลี่ยนแปลงส่วนผสมโลหะในการเชื่อมโดยการเจือจาง	41
2.3.2 ปัญหาในการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดกัน	42
2.3.3 ลำดับขั้นตอนในการเชื่อมและการเลือกใช้ลวดเชื่อม	46
2.4 การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่พัฒนาใหม่สุด	49
2.4.1 เหล็กกล้าไร้สนิมคิวเพล็ก	49
2.4.2 เหล็กกล้าไร้สนิมไนโตรเจนสูง	52
2.4.3 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติกบริสุทธิ์สูง	53
2.4.4 เหล็กกล้าไร้สนิมที่การแข็งตัวตกตะกอน	54
2.5 ตาราง, รูป และ ภาพถ่ายต่างๆ	55
3	
การเชื่อมเหล็กกล้าเจือดำต้านทานความร้อน	87
3.1 ชนิดและคุณลักษณะของเหล็กกล้าเจือดำต้านทานความร้อน	87
3.2 โลหะวิทยาการเชื่อมและความสามารถในการเชื่อม	88
3.2.1 ความสามารถในการแข็งตัวของรอยเชื่อม	88
3.2.2 การแตกร้าวเย็น	89
3.2.3 การแตกร้าวร้อน	90
3.2.4 การแตกร้าวร้อนเมื่อให้ความร้อนซ้ำ	90



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2.5 ผลของการกระทำทางความร้อนหลังการเชื่อม	91
3.2.6 การแตกเปราะในการอบคืนตัว	92
3.2.7 การต่อโลหะต่างชนิดกัน	93
3.3 กรรมวิธีการเชื่อมและวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลือง	95
3.3.1 วิธีการเชื่อมและการนำไปใช้งาน	95
3.3.2 ชนิดและสมบัติของวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลือง	96
3.3.3 แนวทางการเลือกวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลือง	98
3.4 ข้อควรจำทั่วไปของลำดับขั้นตอนการเชื่อม	98
3.4.1 การเตรียมร่องงานเชื่อม	98
3.4.2 การอบแห้งซ้ำก่อนนำลวดเชื่อมไปใช้งาน	99
3.4.3 ก๊าซที่ใช้ปกคลุมและอัตราการไหลของก๊าซ	99
3.4.4 ความสูงของแนวฟลักซ์	99
3.4.5 อุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนและอุณหภูมิระหว่างเปลี่ยน แท่งเชื่อม	100
3.4.6 การกระทำทางความร้อนหลังการเชื่อม	100
3.5 ตาราง, รูป และภาพถ่ายต่างๆ	102
4 การเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (Welding of High Strength Steels)	133
4.1 ชนิดและลักษณะที่สำคัญของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง	133
4.2 ความสามารถในการเชื่อมของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงในการเชื่อมแบบ หลอมละลาย	135
4.2.1 การแข็งตัวของบริเวณกระทบความร้อน	136
4.2.2 รอยแตกร้าวในงานเชื่อม	136
4.2.3 การแทรกตัวได้ของไฮโดรเจน	138
4.3 วิธีการเชื่อมและวิธีดำเนินการในการเชื่อม	139
4.3.1 การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค	139
4.3.2 การเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุม	142
4.3.3 การเชื่อมอาร์คก๊าซคลุม	144
4.3.4 การเชื่อมอาร์คทั้งสแตน (การเชื่อมทิก)	146

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.4 ตาราง, รูป และภาพถ่ายต่างๆ	149
5 การเชื่อมพอกผิวแข็งและการเชื่อมซ่อมแซม (Hardsurfacing and Repair Welding)	175
5.1 ผลดีของการเชื่อมพอกผิวแข็ง	175
5.2 การเลือกหรือแบบต่างๆ ของโลหะ	175
5.3 ความสามารถในการเชื่อมของโลหะขึ้นงาน	176
5.4 ความต้านทานของโลหะต่อการสึกหรอ	177
5.4.1 ความต้านทานต่อการสึกหรอแบบเกาะติด	177
5.4.2 ความต้านทานต่อการขัดถูแบบเซาะและแบบครูด	178
5.4.3 ความต้านทานต่อการขัดถูแบบบด	179
5.4.4 ความต้านทานต่อการขัดถูแบบสีกัด และการสึกหรอแบบ กระแทก	179
5.5 วัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองสำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง	179
5.5.1 ชนิดเฟลิร์ไลติก	179
5.5.2 ชนิดมาร์เตนไซต์ติก	180
5.5.3 ชนิดโบรอนมาร์เตนไซต์ติก	182
5.5.4 ชนิดมังกานีสออกไซด์ในติก	182
5.5.5 ชนิดมังกานีสโครเมียมออกไซด์ในติก	184
5.5.6 ชนิดโครเมียมสูง	184
5.5.7 ชนิดทั้งสเตนคาร์ไบด์	185
5.5.8 ชนิดอื่นๆ	186
5.6 การเชื่อมซ่อมแซมเครื่องดัดใช้กำลัง	186
5.6.1 หน้าคัพเปอร์	187
5.6.2 ฟันคัพเปอร์	187
5.6.3 แท่งสลักและตัวเก็บแท่งสลัก	189
5.6.4 ล้อถูกรอก	189

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5.7 การเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต	189
5.7.1 ลูกกลิ้ง	190
5.7.2 จานโซ่และตัวอิสระ	190
5.7.3 ข้อต่อ	190
5.7.4 ดินตะขาบ	191
5.8 ตาราง, รูป และภาพถ่ายต่างๆ	192
ภาคผนวก	
การเลือกใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์( อิเล็กโทรด )	221

# บทที่ 1

## งานเชื่อมเหล็กหล่อ

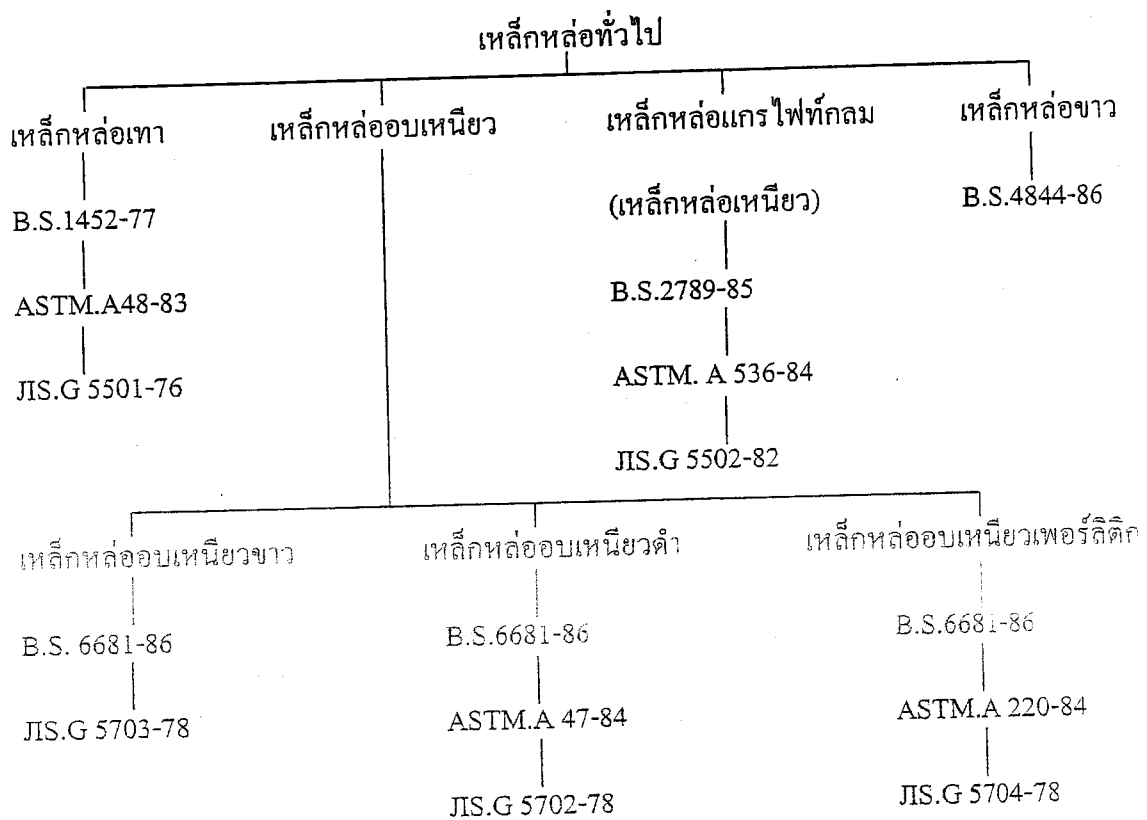
### (Welding of Cast Irons)

#### 1.1 ชนิดและลักษณะที่สำคัญของเหล็กหล่อ

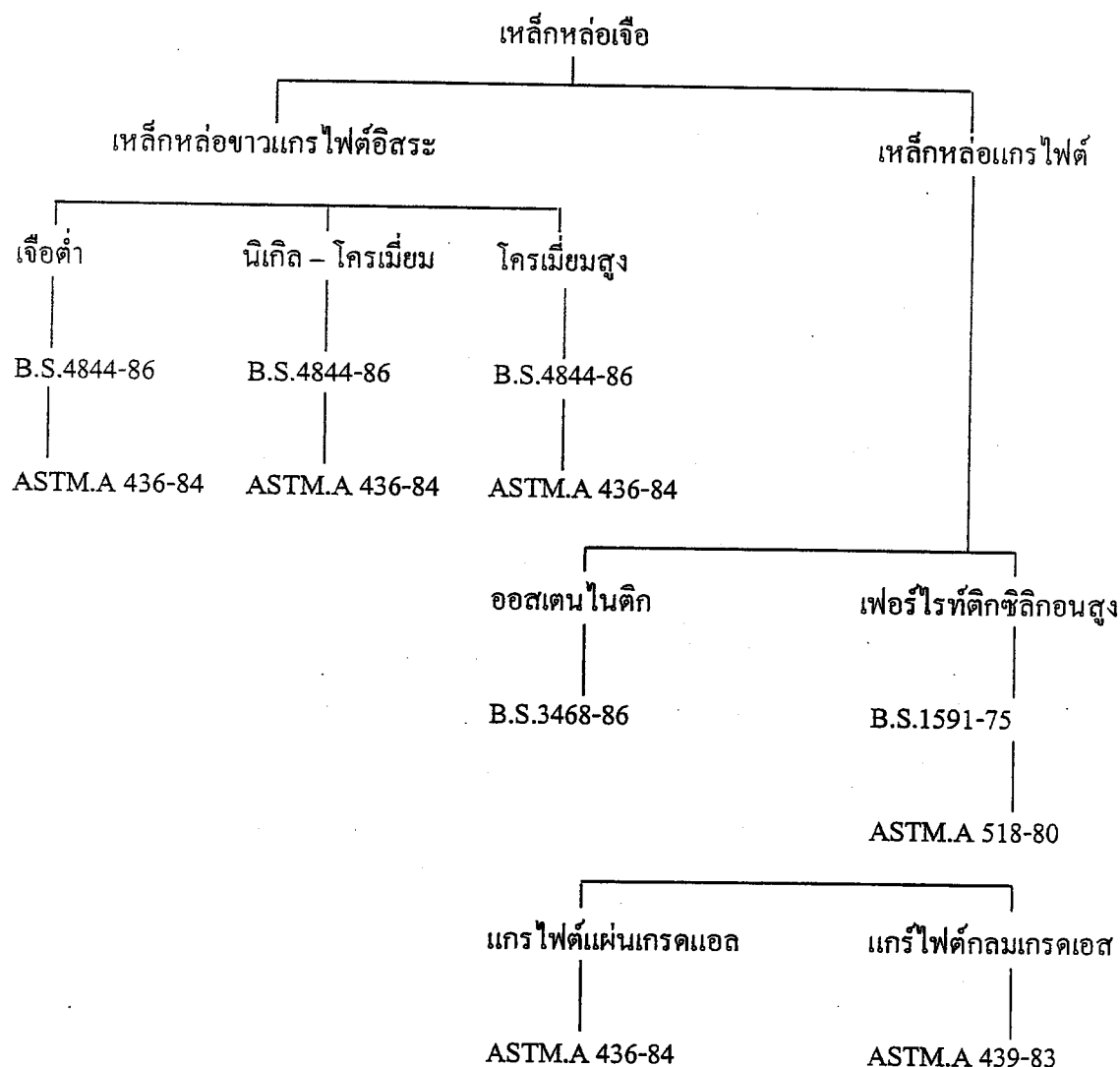
เหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 2.0 ~ 6.67% ถูกเรียกว่า เหล็กหล่อ (Cast iron) อย่างไรก็ตาม เหล็กหล่อที่ใช้ในอุตสาหกรรมด้วยจุดประสงค์ทั่ว ๆ ไปจะมีคาร์บอนผสมอยู่ 2.0 ~ 4.5% ซิลิกอน 1 ~ 3% และแมงกานีส

เหล็กหล่อเจือ (Alloy cast iron) อาจจะมีธาตุเจือชนิดอื่น ๆ ผสมเข้าไปด้วย เพื่อจะได้สมบัติที่ดีตามต้องการ เช่น ความแข็งแรง ความแข็ง ความสามารถในการทำให้แข็ง หรือ การทนทานต่อการกัดกร่อน ธาตุเจือต่าง ๆ ได้แก่ โครเมียม ทองแดง โมลิบดีนัม และนิกเกิล

เหล็กหล่อทั้งหมดนี้สามารถที่จะถูกแบ่งออกไปได้อีกตามรูปที่ 1.1 และรูปที่ 1.2 ซึ่งให้ทั้งมาตรฐานของสหราชอาณาจักร (B.S.) อเมริกา (ASTM) และญี่ปุ่น (JIS)



รูปที่ 1.1 ประเภทของเหล็กหล่อทั่วไป



รูปที่ 1.2 ประเภทของเหล็กหล่อทั่วไป  
(ที่มา : โลหะที่ใช้ในงานโครงสร้าง)

เหล็กหล่อมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ (เช่นเหล็กหล่อทั่วไป =  $1,150^{\circ}\text{ซ}$  -  $1,250^{\circ}\text{ซ}$ ) กว่าจุดหลอมเหลวของเหล็กกล้า เมื่อหลอมละลายจะมีการไหลที่ดีและจะมีการหดตัวมากระหว่างที่เริ่มแข็งตัวและเย็นตัวลง

คุณลักษณะเด่นทางฟิสิกส์ จะมีความสามารถในการหล่อที่ดีในรูปร่างที่ซับซ้อน และเหล็กหล่อที่ทำเป็นแม่พิมพ์ ก็ถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมหลาย ๆ ด้าน อย่างไรก็ตามความเหนียว (toughness) และความอ่อนตัว (ductility) ของเหล็กหล่อ จะต่ำกว่าเหล็กกล้า โดยทั่วไป ซึ่งข้อด้อยของเหล็กหล่อเหล่านี้ เป็นข้อจำกัดของการนำเหล็กหล่อมาใช้งาน

สมบัติทางกลของเหล็กหล่อ ขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างจุลภาค รวมทั้งรูปแบบและการกระจายตัวของแกรไฟต์อิสระ หรือคาร์บอนที่ไม่ได้รวมกับเนื้อเหล็ก ปริมาณ ขนาด และรูปร่างของอนุภาคแกรไฟต์มีผลต่อความแข็งแรงและความสามารถในการอ่อนตัวของเหล็กหล่อ นอกจากนี้เหล็กหล่อยังสามารถที่จะถูกแบ่งได้ตาม คุณสมบัติของแกรไฟต์ที่ปรากฏขึ้นเมื่อทำการขัดให้เรียบจนมองเห็นได้

เหล็กหล้อมีชนิดที่เป็นพื้นฐานอยู่ 4 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 1.1 คือ เหล็กหล่อเทา (Gray iron) เหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable iron) เหล็กหล่อแกรไฟต์กลม (Spheroidal graphite irons) หรือเหล็กหล่อเหนียว (ductile or nodular iron) และเหล็กหล่อขาว (white iron) สมบัติเด่นของเหล็กหล่อชนิดต่าง ๆ ทั้งสี่ชนิดนี้จะถูกกล่าวถึงพอสังเขปในต่อไป

#### 1.1.1 เหล็กหล่อเทา (Gray cast iron)

เหล็กหล่อเทามีคาร์บอนอิสระอยู่ในรูปของ แผ่นแกรไฟต์อยู่ทั่วไปในพื้นผิวซึ่งปกติจะเป็นเพิร์ลไลท์ (pearlite) เฟอไรต์ (ferrite) หรือทั้งสองอย่างผสมกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.3 เหล็กหล่อเทาจะมีความสามารถในการอ่อนตัวได้ดี เพราะแกรไฟต์อยู่ในรูปแบบแผ่นเหล็กหล่อชนิดนี้ถูกเรียกชื่อตามสีเทาที่เห็นได้เมื่อทำการหักดูผิวเนื้อของเหล็ก



รูปที่ 1.3 โครงสร้างจุลภาพของเหล็กหล่อ

น้ำยาคัดกรด : กรดพิกตริก (Picric acid)

กำลังขยาย : 150 เท่า

โครงสร้าง : แกรไฟต์แผ่นในพื้นผิวของเฟอไรต์ติก และเพิร์ลไลท์ติก

ตารางที่ 1.1 จะให้รายละเอียดสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเทา FC-20 และ FC-25 ซึ่งได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อเทาไม่ได้ให้รายละเอียดไว้ อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปแล้วจะมีส่วนผสมทางเคมี ดังนี้คือ คาร์บอน 2.5-4.0% ซิลิกอน 1.4-2.5% มังกานีส 0.4-1.0% ฟอสฟอรัส 0.05-1.0% และซัลเฟอร์ 0.06-0.15% ส่วนการใช้งานโดยทั่วไปก็ได้แก่ ชิ้นส่วนของมอเตอร์รถยนต์ เปลือกนอกของปั๊ม แผ่นชิ้นงานและชิ้นส่วนของเครื่องมือกล

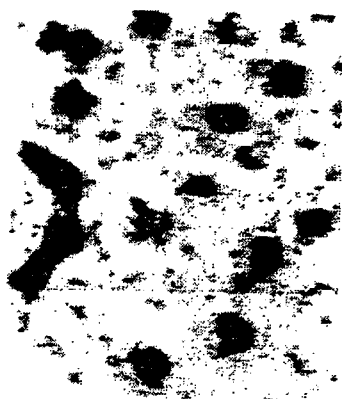
ตารางที่ 1.1 สมบัติทางกลของเหล็กหล่อเทา (JIS.G 5501-76)

ประเภท	ความหนา ; T มม.	ความแข็งแรงทางดึง กก.แรง/มม. <sup>2</sup> (นิวตัน/มม. <sup>2</sup> )	ความแข็ง HB
FC-20	$4 < T \leq 8$	$\geq 24(235)$	$\leq 255$
	$8 < T \leq 15$	$\geq 22(216)$	$\leq 235$
	$15 < T \leq 30$	$\geq 20(196)$	$\leq 223$
	$30 < T \leq 50$	$\geq 17(167)$	$\leq 217$
FC-25	$4 < T \leq 8$	$\geq 28(275)$	$\leq 269$
	$8 < T \leq 15$	$\geq 26(225)$	$\leq 248$
	$15 < T \leq 30$	$\geq 25(245)$	$\leq 241$
	$30 < T \leq 50$	$\geq 22(216)$	$\leq 229$

### 1.1.2 เหล็กหล่อเหนียว (Ductile cast iron)

สมบัติทางกลของเหล็กหล่อเทาอาจจะดีขึ้นอย่างมาก ถ้าเหล็กที่หลอมเหลวอยู่ซึ่งมีส่วนผสมของคาร์บอน 3.2~4.5% และซิลิกอน 1.8~2.8% ถูกทำการปรับสภาพด้วยแมกนีเซียมหรือซีเรียมโดยการเติมลงไปในเหล็กที่กำลังหลอมเหลวก่อนที่จะเทลงแบบหล่อ ผลผลิตของเหล็กหล่อนี้จะทำให้ได้แกรไฟต์เป็นรูปกลม แทนที่จะเป็นแผ่นเหมือนเดิม ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 1.4 และเหล็กชนิดนี้รู้จักกันในนาม เหล็กโนดูลาร์ (Nodular) เหล็กหล่อแกรไฟต์กลม (Spheroidal graphite) หรือเหล็กหล่อเหนียว (Ductile cast iron)

เหล็กหล่อเหนียวได้ถูกทำให้มีส่วนผสมของซัลเฟอร์ (ไม่เกิน 0.08%) และฟอสฟอรัส (ไม่เกิน 0.02%) ต่ำกว่าเหล็กหล่อเทา เพราะว่าทั้งซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสนี้เป็นธาตุที่ทำให้แกรไฟต์แผ่นเปลี่ยนเป็นแกรไฟต์กลมได้ยาก



รูปที่ 1.4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว

น้ำยาคัดกรด : กรดพิกตริก (Picric acid)

กำลังขยาย : 100 เท่า

โครงสร้าง : แกรไฟต์กลมในพื้นเฟอร์ไรติกและ  
เพิร์ไลติก

รูปร่างของแกรไฟต์ที่กลมจะช่วยให้สมบัติทางกลของเหล็กหล่อดีขึ้น โดยจะทำให้ความเหนียวและความแข็งแรงทางดึงสูงขึ้นมากกว่าเหล็กหล่อเทา นอกจากนี้เหล็กหล่อเหนียวยังมีความทนทานต่อการสึกหรอทางกลมากกว่าด้วย และภายใต้การให้ความร้อนเป็นวัฏจักรก็จะมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่น้อยมาก นั่นก็คือ เหล็กหล่อเหนียวได้ถูกนำมาใช้กับงานต่าง ๆ เช่น ข้อเหวี่ยง (Crank shafts) ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ (Engine liners) เฟือง ลูกรีด แบบหล่ออิลกอท (Ingot cases)

ตารางที่ 1.2 เป็นรายละเอียดสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเหนียวประเภท FCD-40 FCD-45 และ FCD-70 ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง

ตารางที่ 1.2 สมบัติทางกลของเหล็กหล่อเหนียว (JIS.G 5502-86)

ประเภท	ความแข็งแรงทางดึง กก.แรง/มม. <sup>2</sup> (นิวตัน/มม. <sup>2</sup> )	ความแข็งแรงที่ 0.2% จุดเยื้อง กก.แรง/มม. <sup>2</sup> (นิวตัน/มม. <sup>2</sup> )	ค่ายืด %
FCD-40	$\geq 40(392)$	$\geq 26(255)$	$\geq 12$
FCD-45	$\geq 45(441)$	$\geq 29(284)$	$\geq 10$
FCD-70	$\geq 70(686)$	$\geq 43(422)$	$\geq 2$

### 1.1.3 เหล็กหล่อขาว (White cast iron)

ในกรณีที่เหล็กหล่อมีส่วนผสมของคาร์บอนและซิลิกอนที่ต่ำกว่า เหล็กหล่อเทา ทั่วๆ ไป คาร์บอนที่มีอยู่ก็จะไม่แปรรูปเป็นแกรไฟต์ระหว่างที่มีการแข็งตัว แต่จะกลายมาเป็นเหล็กคาร์ไบด์

เหล็กคาร์ไบด์นี้หรือซีเมนไตท์ (Cementite) มีความแข็ง และเปราะ และเป็นเหล็กหล่อที่มีความแข็งแรงทางอัดสูง นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อการสึกหรอที่สูง ซึ่งจะคงทนอยู่จนถึงอุณหภูมิที่ร้อนแดงสำหรับช่วงที่ถูกจำกัด เหล็กหล่อชนิดนี้ถูกเรียกว่า เหล็กหล่อขาวก็เนื่องจากว่า เมื่อหักออกดูเนื้อในแล้วจะเป็นฟลักสีขาว

### 1.1.4 เหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable cast iron)

เหล็กหล่ออบเหนียวถูกผลิตขึ้นมาโดยใช้กรรมวิธีทางความร้อน (heat treating) ต่อเหล็กหล่อขาว ซึ่งเป็นการทำให้คาร์บอนแตกตัว กระจายอยู่ในพื้นของเฟอร์ไรต์ หรือ เฟอไรต์กลิทกรูปร่างที่เกือบกลมของคาร์บอนจะช่วยให้ความเหนียวของเหล็กหล่อนี้ดีขึ้น



เหล็กหล่ออบเหนียวแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ชนิด คือ เหล็กหล่ออบเหนียวขาว (whiteheart) และ เหล็กหล่ออบเหนียวดำ (blackheart)

เหล็กหล่ออบเหนียวขาวทำมาจากเหล็กหล่อขาวคาร์บอนสูงโดยนำมาอบที่อุณหภูมิ 850-1000 °ซ เป็นเวลา 100-120 ชั่วโมง ในตัวกลางที่สามารถรวมตัวกับคาร์บอนได้ โดยที่คาร์บอนจะถูกกำจัดออกจากผิวของเหล็กหล่อนั้น แต่ปริมาณคาร์บอนที่สูงกว่าในแกนกลางก็ยังคงมีอยู่เช่นเดิม

เหล็กหล่ออบเหนียวดำ ทำขึ้นมาจากการอบเหล็กหล่อขาว โดยไม่มีการดึงคาร์บอนออกมาจากผิวเหล็กหล่อ โดยอบที่อุณหภูมิ 700-900 °ซ เป็นเวลา 60-70 ชั่วโมง ซึ่งซีเมนต์ไคท์จะแยกตัวมาเป็นแกรไฟต์และเมื่อหักดูแล้วจะเห็นเป็นสีดำ

โครงสร้างภายในที่ได้นี้จะเป็คาร์บอนที่แยกตัวออกมาอยู่ในพื้นของเฟอร์ไรต์กทั่วทั้งภาคตัดขวางภายใน

การใช้งานโดยทั่ว ๆ ไป ก็คือใช้ทำชิ้นส่วนของมอเตอร์ยานยนต์ต่าง ๆ ลูกกรัดเครื่องจักรกล และชิ้นส่วนของเรือเดินทะเล เป็นต้น

## 1.2 ความสามารถในการเชื่อมของเหล็กหล่อในการเชื่อมแบบหลอมละลาย

งานเชื่อมถูกใช้สำหรับการซ่อมแซมสิ่งบกพร่องในงานหล่อ และชิ้นส่วนที่แตกหักหรือสึกหรอในระหว่างการใช้งาน

เหล็กหล่อทุกชนิดยกเว้นเหล็กหล่อขาว ถูกกำหนดไว้ว่าสามารถที่จะเชื่อมได้แต่จะมีพิสัยความง่ายในการเชื่อมน้อยกว่าเหล็กกล้า และเหล็กหล่อแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นความสามารถในการเชื่อมก็จะแตกต่างกันออกไปด้วย เช่น เหล็กหล่อบางชนิดจะถูกเชื่อมได้โดยง่าย และบางชนิดก็จำเป็นจะต้องทำการเชื่อมอย่างมีลำดับขั้นตอนการเชื่อมหรือต้องมีวิธีดำเนินการเชื่อม (Welding procedure)

### 1.2.1 ปัญหาทั่วไปสำหรับความสามารถในการเชื่อม

เหล็กหล่อทุกชนิดมีปัญหาข้อยุ่งยากทั่ว ๆ ไปซึ่งมีผลต่อความสามารถในการเชื่อม ดังนี้คือ (1) มีคาร์บอนมากเกินไป (2) มีความเหนียวต่ำ (3) มีส่วนผสมของฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ และออกซิเจนสูง (4) สิ่งบกพร่องที่เกิดจากงานหล่อ และ (5) น้ำมันซึมซับได้ดี

(1) ภายใต้วฏจักรของความร้อนในการเชื่อม เหล็กหล่อตรงส่วนรอยต่อของโลหะรอยเชื่อม จะได้รับความร้อนที่สูงมากเกินไป และอัตราการเย็นตัวของบริเวณกระทบร้อนทั้งหมดก็เร็วมากด้วยเหตุนี้ เหล็กคาร์ไบด์ ก็จะเกิดขึ้นที่บริเวณกระทบร้อน (heat-affected zone) ที่รอยต่อกับโลหะ

รอยเชื่อม และบริเวณถัดมาของบริเวณกระทบบร้อนก็จะเกิดโครงสร้างจุลภาคมาร์เตนไซต์คาร์บอนสูง โครงสร้างจุลภาคของทั้งสองชนิดนี้มีความแข็งและเปราะมาก และเป็นสาเหตุของการแตกร้าวทั้งก่อนการนำไปใช้งานหรือระหว่างการใช้งาน พิสัยของความเปราะและแนวโน้มเกิดการแตกร้าวจะขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กหล่อ และวิธีดำเนินการเชื่อมคาร์บอนจะรวมตัวกับออกซิเจนกลายเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ซึ่งจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสิ่งบกพร่องในงานเชื่อมก็คือเกิดโพรงก๊าซขึ้นในรอยเชื่อม

(2) ในการเชื่อมแบบหลอมละลาย เพราะตรงส่วนที่ถูกการเชื่อมกระทบนั้นจะได้รับทั้งความร้อนและการเย็นตัว ก็จะทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิขึ้นในบริเวณรอยเชื่อม โดยจากการขยายตัวอันเนื่องมาจากความร้อนและการหดตัวเนื่องมาจากความเย็นตัวลง โลหะชิ้นงานควรจะสามารมีการแปรเปลี่ยนได้อย่างถาวรเฉพาะที่ เพื่อที่จะทำตัวให้เหมาะสมกับความเค้นจากการเชื่อม หรือมีฉะนั้นการแตกร้าวก็จะเกิดขึ้นมาได้ โดยทั่ว ๆ ไปเหล็กหล่อมีความสามารถที่จะเกิดการแตกร้าว เพราะว่าสมบัติที่มีความเหนียวต่ำ อาจจะไม่สามารถต่อต้านการหดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเย็นตัวลงของรอยเชื่อม

(3) ปริมาณฟอสฟอรัสที่มีอยู่สูงจะเป็นตัวที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปเป็นโลหะผสมที่แข็งของเหล็ก หรือคาร์บอน ซึ่งทำให้เหล็กหล่อมีความเปราะ สำหรับส่วนผสมของออกซิเจนหรือซัลเฟอร์ที่สูงจะเป็นตัวเร่งให้คาร์บอนตกตะกอนเป็นคาร์ไบด์ ทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคนิดเหล็กหล่อขาว ซึ่งมีความแข็งและเปราะ

ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ หรือออกซิเจนที่หลอมละลายปนอยู่ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม จะมีผลทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้นที่รอยเชื่อม

(4) เหล็กหล่อทั่ว ๆ ไป มักจะมีสิ่งบกพร่องที่เกิดจากงานหล่อ เช่น ทรายฝังในและโพรงที่เกิดจากการหดตัว ซึ่งเป็นตัวต่อต้านไม่ให้เกิดการหลอมละลายที่สมบูรณ์ หรือการไม่รวมตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่หลอมเหลวกับโลหะชิ้นงาน

(5) เหล็กหล่อที่หลังจากผ่านการใช้งานแล้วมักจะถูกแทรกซึมด้วยน้ำมันต่าง ๆ ซึ่งก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสิ่งบกพร่องในงานเชื่อม เช่น โพรงก๊าซ และการแตกร้าว

### 1.2.2 ผลของรูปแบบของแกรไฟต์ต่อความสามารถในการเชื่อม

การเกิดสารผสมคาร์ไบด์และมาร์เทนไซต์คาร์บอนสูง น้อยที่สุด จะเป็นประโยชน์อย่างมากที่จะทำให้แกรไฟต์ แยกตัวออกมาในลักษณะกลมซึ่งมีอัตราส่วนของผิวหน้ากับปริมาตรที่ต่ำบริเวณผิวหน้าที่น้อยกว่าในโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิห้อง แกรไฟต์รูปแผ่นในเหล็กหล่อเทาจะมีแนวโน้มที่สูงมากในการที่จะละลายอยู่ในออสเตนไนท์ เพราะว่ามันมีบริเวณผิวหน้าที่ใหญ่

เหล็กหล่อเทาเป็นเหล็กที่มีความเปราะและมักจะไม่สามารถทนทานต่อการหดตัวทางความเค้นที่เพิ่มขึ้นในงานเชื่อม การมีความเหนียวที่ต่ำจะมีสาเหตุมาจากแกรไฟต์รูปแผ่น และเหล็กหล่อที่มีแกรไฟต์เป็นรูปแผ่นยาว ๆ จะมีความเปราะมากกว่า และความสามารถในการเชื่อมน้อยกว่าเหล็กหล่อที่มีแกรไฟต์เป็นรูปแผ่นสั้น ๆ หรือแกรไฟต์รูปกลม

เหล็กหล่อเหนียวมีแกรไฟต์ในรูปกลม และมีความเหนียวดีกว่าเหล็กหล่อชนิดอื่น ๆ ตามที่กล่าวมาแล้ว นั่นก็คือ เหล็กหล่อชนิดนี้มีความสามารถในการเชื่อมที่ดีกว่าเหล็กหล่อชนิดอื่น ๆ

### 1.3 กรรมวิธีการเชื่อมแบบต่าง ๆ

ข้อสรุปของกรรมวิธีการเชื่อมที่นำมาใช้กับเหล็กหล่อได้ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 1.3 รวมทั้งคุณลักษณะเด่นที่สำคัญและชนิดต่าง ๆ ของวัสดุงานเชื่อมสัณเป็ลียง หรือโลหะเติม (ลวดเชื่อม) ที่ถูกนำมาใช้ในแต่ละกรรมวิธีการเชื่อม

ตารางที่ 1.3 สรุปคุณลักษณะหลักของกรรมวิธีการเชื่อมและวัสดุงานเชื่อมสัณเป็ลียง สำหรับการเชื่อมเหล็กหล่อ (ที่มา : โลหะงานโครงสร้าง)

กรรมวิธีการเชื่อม	การซึมลึกและการเจือจาง	การประสานเข้ากันของสี	ประสิทธิภาพของรอยต่อ (%)	ความสามารถในการแปรรูปของรอยเชื่อมและบริเวณกระทบร้อน (HAZ)	โลหะเติม
การเชื่อมก๊าซ (Oxyacetylene)	ต่ำ	ดี	100	ดี	เหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อเหนียว
การเชื่อมบรอนซ์ (การเชื่อมทองเหลือง)	ศูนย์	ไม่ดี	สูงถึง 100 ความแข็งแรงต่ำเมื่อเกิน 300 °ซ	ดี	ทองเหลือง (41~63 ทองแดง)

กรรมวิธีการเชื่อม	การซึมลึกและ การเจาะ	การประสาน เข้ากันของสี	ประสิทธิภาพ ของรอยต่อ (%)	ความสามารถในการ แปรรูปของรอยเชื่อม และบริเวณกระทบ ร้อน (HAZ)	โลหะเติม
การเชื่อมอาร์ค โดยใช้คน (MMA)	ปานกลาง	ไม่ดี	สูงถึง 100	ไม่ดีนัก	นิเกิล 55Ni~45Fe
การเชื่อมมิก (MIG)	ต่ำถึงปานกลาง ขึ้นอยู่กับเงื่อนไข สภาวะของ การเชื่อม	ไม่ดี	สูงถึง 100	ไม่ดีนัก	นิเกิล 55Ni~45Fe อลูมิเนียม-บรอนซ์
การเชื่อมใช้ผง โลหะ (Powder welding)	ศูนย์	ไม่ดี	สูงถึง 100	ดี	นิเกิล นิเกิล-โครเมียมแข็ง

### 1.3.1 การเชื่อมก๊าซ (Oxyacetylene welding)

การเชื่อมก๊าซเป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่เคยใช้กันมาเป็นเวลานานแล้ว ในกรรมวิธีนี้ ความร้อนจากเปลวไฟอะเซทิลีน สามารถที่จะนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการอุ่นชิ้นงาน ก่อนเชื่อมที่บริเวณรอบ ๆ รอยเชื่อมโดยไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนเพียงเพื่อการเชื่อมเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม การใช้อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานที่สูงก็มีความจำเป็นเพื่อที่จะทำให้ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ สำหรับการให้ความร้อนอุ่นชิ้นงานที่ยาวนานเกินไปก็จะเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งานของกรรมวิธีนี้ต่อ งานหล่ออันเนื่องมาจากปัญหาในการบิดตัวที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน ในการเชื่อมวิธีนี้จะต้องใช้เปลวไฟ เป็นกลางหรือ เปลวไฟที่ลดออกซิเจนลงเล็กน้อย

### 1.3.2 การเชื่อมทองเหลือง (Brace welding)

การเชื่อมทองเหลืองก็เช่นเดียวกับการเชื่อมบรอนซ์ (bronze welding) เป็นเทคนิคการ เชื่อมคล้าย ๆ กับการเชื่อมหลอมละลายโดยใช้โลหะเติมหรือลวดเชื่อม เช่น แท่งลวดเชื่อมทองแดง สังกะสี ซึ่งมีจุดหลอมละลายที่ต่ำกว่าโลหะชิ้นงาน กรรมวิธีนี้ไม่ได้ใช้การแทรกซึมของของเหลวใน ช่องแคบ (Capillary action) เช่น ในการบัดกรีแข็ง หรือการบัดกรีทองเหลือง (brazing) และ ไม่ได้ ใช้การเชื่อมหลอมละลายกับโลหะชิ้นงานด้วย การเชื่อมทองเหลืองด้วยหัวเชื่อมก๊าซนี้สามารถที่จะ นำไปใช้ในการซ่อมแซมงานหล่อที่ผ่านการใช้งานมาแล้วแต่ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการซ่อมงาน

หล่อที่ใหม่ยังไม่ได้นำไปใช้งาน เพราะว่าการประสานเข้ากันระหว่างเนื้อโลหะรอยเชื่อมกับโลหะชิ้นงานจะไม่ดี โดยทั่ว ๆ ไปฟลักซ์ที่เหมาะสมจะถูกใช้ในการเชื่อมโดยการใส่ปลายแท่งลวดเชื่อมเปลี่ยนจุ่มลงไปในฟลักซ์ หรือใช้แท่งลวดเชื่อมที่หุ้มฟลักซ์ไว้แล้ว ในการเติมลวดเชื่อมลงในรอยต่อผิวหน้าของร่องจะต้องถูกเชื่อมพอกให้ตลอดและสูงขึ้นมา เพื่อเป็นการแน่ใจว่ามีการเคลือบและหลอมละลายที่ดีระหว่างโลหะชิ้นงานกับเนื้อโลหะรอยเชื่อม

### 1.3.3 การเชื่อมโลหะแบบปกคลุมการอาร์ค (Shielded metal arc welding)

การเชื่อมอาร์คโดยใช้คน (manual metal arc welding) หรือการเชื่อมโลหะแบบปกคลุมการอาร์ค เป็นกรรมวิธีที่ให้ประสิทธิภาพการเชื่อมที่สูงกว่า อันเนื่องมาจากอัตราการเติมเนื้อโลหะที่สูง และการให้การซึมลึกที่ลึกกว่ากรรมวิธีการเชื่อมแบบอื่น ๆ จะมีการเจือจางของโลหะชิ้นงานเข้าไปในโลหะรอยเชื่อม นั่นก็คือ ลวดเชื่อม หรืออิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์จะต้องเลือกให้เข้ากันกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอน ซึ่งนี่ก็เป็นเหตุผลของการใช้อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์เป็นโลหะชนิดนอกกลุ่มเหล็ก หรือใช้อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ชนิดคาร์บอนต่ำ

การใช้อุณหภูมิสูงสำหรับการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม หรือการใช้อุณหภูมิต่ำสำหรับการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมก็จะขึ้นอยู่กับชนิดของอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ที่นำมาใช้

### 1.3.4 การเชื่อมอาร์คก๊าซคลุม (Gas metal arc welding)

การเชื่อมมิก หรือการเชื่อมแม็ก หรือการเชื่อมอาร์คก๊าซคลุม เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อม เหล็กหล่อเหนียว เนื่องจากการให้ความร้อนเข้า (heat input) ที่ต่ำ เช่น การเชื่อมชนิดถ่ายโอนแบบลัดวงจร และการเชื่อมแบบพัลส์อาร์ค การได้ความร้อนเข้าที่ต่ำทำให้ปริมาณของเหล็กคาร์ไบด์ที่เปราะเกิดขึ้นได้น้อยในบริเวณกระทบร้อนซึ่งจะเป็นการต่อต้านการแตกร้าวได้ดี

### 1.3.5 กรรมวิธีการเชื่อมแบบอื่น ๆ

การเชื่อมโดยใช้ผงโลหะ (Powder welding) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมก๊าซที่มีความร้อนเข้าที่ต่ำโดยเป็นโลหะเดิมในรูปแบบที่เป็นผงโลหะ บรรจุอยู่ในถังที่ติดกับหัวเชื่อมก๊าซอะเซทิลีนแบบพิเศษ

กรรมวิธีการบัดกรีแข็ง (brazing) ที่เหมาะกับเหล็กกล้าก็สามารถนำมาใช้ได้กับเหล็กหล่อได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม กรรมวิธีที่ใช้การควบคุมอุณหภูมิโดยอัตโนมัติจะเป็นที่ต้องการมากที่สุด เพราะว่าเหล็กหล่อจะต้องไม่มีการถูกความร้อนมากเกินไปในระหว่างการทำงานของการทำงานของการบัดกรีแข็ง หรือการบัดกรีทองเหลือง

กรรมวิธีการเชื่อมแบบอัตโนมัติ ด้วยความร้อนเข้าที่สูงกว่า เช่น การเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุม (Submerged arc welding) การเชื่อมอิเล็กโทรสแลค (Electroslag welding) และการเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam welding) กำลังอยู่ในระหว่างการค้นคว้าทำวิจัย และปรับปรุงให้ดีขึ้นสำหรับการนำมาใช้กับเหล็กหล่อ

#### 1.4 วัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลือง (Welding consumables)

วัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลือง หรือลวดเชื่อม ควรจะเลือกให้เหมาะสมกับชนิดของกรรมวิธีการเชื่อมที่ได้นำมาใช้ ชนิดของเหล็กหล่อที่จะมาเชื่อม ความจำเป็นในการแปรรูปหลังการเชื่อม ความสามารถในการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อม และกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม ความต้องการสมบัติทางกลของรอยต่อ ความจำเป็นที่จะประสานเข้ากันของเนื้อโลหะรอยเชื่อมโลหะขึ้นงาน เป็นต้น

ตารางที่ 1.4 แสดงรายละเอียดของโลหะเติม หรือลวดเชื่อม สำหรับเหล็กหล่อที่เกี่ยวข้องกับชนิดของโลหะเติม กรรมวิธีการเชื่อมที่สามารถใช้ได้ รายละเอียดที่กำหนดของ AWS. และการแบ่งประเภทของ AWS.

ตารางที่ 1.5 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ สำหรับเหล็กหล่อซึ่งกำหนดโดยสมาคมอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (JIS.)

ตารางที่ 1.6 แสดงส่วนผสมทางเคมีของแท่งโลหะเติมเหล็กหล่อ และตารางที่ 4.4 ก็เป็นตัวอย่างเป็นตัวอย่างของฟลักซ์สำหรับการเชื่อมก๊าซซึ่งกำหนดโดยสมาคมวิศวกรรงานเชื่อมแห่งญี่ปุ่น (JWES)

ตารางที่ 1.4 โลหะเติมสำหรับการเชื่อมเหล็กหล่อ (ที่มา : คู่มืองานเชื่อมของ AWS.)

ชนิด	รูปแบบ	กรรมวิธี ที่ใช้งานได้	ข้อกำหนดของ AWS	ประเภทของ AWS
<u>เหล็กหล่อ</u>				
เหล็กหล่อเทา	แท่งลวดเชื่อม	OAW	A 5.15	RCI
เหล็กหล่อเทาเงือ	“	“	“	RCI-A
เหล็กหล่อเหนียว	“	“	“	RCI-B
<u>เหล็กเหนียว</u>				
เหล็กคาร์บอน	อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์	SMAW	A 5.15	Est
“	“	“	A 5.1	E 7018
“	อิเล็กโทรดเปลือย	GMAW	A 5.18	E 70 S-2
<u>นิกเกิลเงือ</u>				
นิกเกิล 93%	อิเล็กโทรดเปลือย	GMAW	A 5.14	ERNi-1
นิกเกิล 95%	อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์	SMAW	A 5.15	ENi-CI
				ENi-CI-A
53Ni-45Fe	อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์	SMAW	A 5.15	ENiFe-CI
				ENiFe-CI-A
55Ni-40Cu-4Fe	“	“	“	ENiCu-A
65Ni-30Cu-4Fe	“	“	“	ENiCu-B
<u>ทองแดงเงือ</u>				
ทองเหลืองคั่วเชื่อมน้อย	แท่งลวดเชื่อม	OAW	A 5.27	RCuZn-B
“	“	“	“	RCuZn-C
ทองเหลืองนิกเกิล	“	“	“	RBCuZn-D
ทองแดง-ดีบุก	อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์	SMAW	A 5.6	ECuSn-A
“	อิเล็กโทรดเปลือย	GMAW	A 5.7	ERCuSn-A
ทองแดง-อลูมิเนียม	อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์	SMAW	A 5.6	ECuAl-A2
“	อิเล็กโทรดเปลือย	GMAW	A 5.7	ERCuAl-A2

หมายเหตุ : OAW = การเชื่อมก๊าซออกซิอะเซทิลีน SMAW = การเชื่อมโลหะแบบปกคลุมการอาร์ค  
GMAW = การเชื่อมอาร์คก๊าซคลุม อาร์ค

ตารางที่ 1.5 มาตรฐานอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับเหล็กหล่อ (JIS.Z 3252-76)

ชนิดของอิเล็กโทรด	ส่วนผสมทางเคมี (%)							
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Fe	Cu
DFC <sub>Ni</sub>	≤1.8	≤1.0	≤2.5	≤0.04	≤0.04	≥92	-	-
DFC <sub>NiFe</sub>	≤2.0	≤2.5	≤2.5	≤0.04	≤0.04	40~60	ส่วนที่เหลือ	-
DFC <sub>NiCu</sub>	≤1.7	≤2.0	≤1.0	≤0.04	≤0.04	≥60	≤2.5	25~35
DFCC <sub>I</sub>	1.0~5.0	≤1.0	2.5~9.5	≤0.20	≤0.04	-	ส่วนที่เหลือ	-
DFC <sub>Fe</sub>	≤0.15	≤0.8	≤1.0	≤0.03	≤0.04	-	ส่วนที่เหลือ	-

ตารางที่ 1.6 ส่วนผสมทางเคมีของแท่งโลหะเติมเหล็กหล่อ (WES 7103-86)

ชนิด*	C	Si	Mn	P	S	Ce	Mg
Ci	3.2	3.0	0.50	0.07	0.10	-	-
	~3.8	~4.0	~0.80	~0.75	สูงสุด		
CID	3.2	3.0	0.10	0.07	0.02	0.10	0.04
	~3.8	~4.5	~0.40	~0.45	สูงสุด	~0.20	~0.10

\* CI สำหรับเหล็กหล่อเทาและ CID สำหรับเหล็กหล่อเหนียว

ตารางที่ 1.7 ตัวอย่างของอัตราส่วนผสมของฟลักซ์ (%) (WES 7103-86)

ชนิด	A	B	C
โซเดียมคาร์บอเนต	15	40	80
โบแรกซ์	15	15	-
โซเดียมไฮดรอกไซด์	70	40	-
ซิลิกา	-	5	2
กรดบอริก	-	-	18



#### 1.4.1 แท่งลวดเชื่อมและฟลักซ์สำหรับการเชื่อมก๊าซ

สำหรับเหล็กหล่อเทา จะใช้แท่งลวดเชื่อมเหล็กหล่อเทาของ AWS. ชนิด RCI, RCI-A และของ JWES ชนิด CI แท่งลวดเชื่อมชนิด RCI-A จะมีปริมาณของโมลิบดีนัมและนิเกิลอยู่เล็กน้อยเช่นเดียวกับ คาร์บอน ซิลิกอน มังกานีส ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ ซึ่งจะทำให้น้ำโลหะเดิมมีความแข็งแรงสูงกว่า การใช้แท่งลวดเชื่อมชนิด RCI

แท่งลวดเชื่อมชนิด RCI-B ของ AWS. และชนิด CID ของ JWERS ถูกออกแบบมาให้ใช้กับเหล็กหล่อเหนียว แต่ก็สามารถนำไปใช้ได้กับเหล็กหล่อเทา แท่งลวดเชื่อมเหล่านี้จะมีธาตุซีเรียม และแมกนีเซียมผสมอยู่ด้วยเล็กน้อย ซึ่งจะช่วยให้เกรไฟต์รวมตัวกันในโลหะรอยเชื่อมระหว่างการแข็งตัวทำให้น้ำโลหะเดิมของรอยเชื่อมมีความเหนียว และสามารถประสานเข้ากันได้เป็นอย่างดีเยี่ยมกับโลหะชิ้นงาน

ฟลักซ์มีความจำเป็นอย่างมากในการเชื่อมก๊าซเพราะช่วยให้มีการไหลตัวอย่างดีของเหล็กลวดเชื่อมที่หลอมเหลวกับตะกั่วที่ติดขึ้นในโลหะรอยเชื่อมที่หลอมเหลว ตะกั่วที่เกิดขึ้นนี้จะกำจัดออกได้ยากมากไม่ได้ใช้ฟลักซ์ในการเชื่อม แท่งลวดเชื่อมที่หุ้มฟลักซ์ไว้แล้วจะมีขายอยู่ทั่วไป แต่ในทางปฏิบัติที่นิยมใช้กันนั้นจะเป็นการใช้แท่งลวดเชื่อมเปลือยที่ปลายข้างหนึ่งถูกเผาให้อุ่นขึ้นแล้วจุ่มลงไปในฟลักซ์ซึ่งแสดงอยู่ในตารางที่ 1.7 เพื่อให้ฟลักซ์ติดขึ้นมา แล้วจึงถ่ายโอนลงไปนรอยเชื่อม

#### 1.4.2 แท่งลวดเชื่อม และฟลักซ์สำหรับการเชื่อมทองเหลือง

โลหะเดิมทองแดงเจือเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป สำหรับการเชื่อมทองเหลือง ซึ่งแสดงอยู่ในตารางที่ 1.4 เช่นเดียวกับโลหะเดิมในหมวดของการเชื่อมก๊าซ ความแข็งแรงของรอยต่อจะเท่ากันกับการเชื่อมหลอมละลายกับเหล็กหล่อเทา แต่จะไม่เท่ากับการเชื่อม เหล็กหล่อเหนียวหรือเหล็กหล่ออบเหนียว ตัวอย่างเช่น การเชื่อมกับเหล็กหล่อเหนียว ประสิทธิภาพของรอยต่อจะได้ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้แท่งลวดเชื่อมตาม AWS. ชนิด RBCuZn-D และจะได้ลดลงเมื่อใช้แท่งลวดเชื่อมชนิด RB Cu Zn เบอร์อื่น ๆ

โดยทั่ว ๆ ไป ฟลักซ์จะถูกใช้ร่วมกับแท่งลวดเชื่อมโดยการใช้เปลวไฟเผาปลายข้างหนึ่งของแท่งลวดเชื่อมให้อุ่นขึ้นเล็กน้อย แล้วจึงจุ่มปลายแท่งลวดเชื่อมนั้นลงไปนผงฟลักซ์ แท่งลวดเชื่อมที่หุ้มฟลักซ์แล้วนี้จะถูกนำไปใช้ในการเชื่อมต่อไป สำหรับแท่งลวดเชื่อมที่หุ้มฟลักซ์ไว้เรียบร้อยแล้วก็มีขายในท้องตลาดทั่วไป

### 1.4.3 อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค (SMAW)

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ที่ทำจากนิเกิล นิเกิลเจือ เหล็กละมุน ทองแดงเจือ และเหล็กหล่อ สามารถนำมาใช้ได้กับการเชื่อมโลหะปกคลุมการอาร์คสำหรับเหล็กหล่อ อิเล็กโทรดเหล่านี้ได้ถูกกำหนดแบ่งประเภททั้งของ AWS และ JIS ดังแสดงอยู่ในตารางที่ 1.4 และตารางที่ 1.5

#### 1.4.3.1 อิเล็กโทรดนิเกิล

อิเล็กโทรดชนิดนิเกิลนี้ไม่เป็นปัญหาสำหรับการดึงคาร์บอนจากเหล็กหล่อ เพราะคาร์บอนจะแยกตัวออกในรูปของแก๊สไฟที่เล็กละเอียด และจะได้รอยเชื่อมที่เหนียว และสามารถนำไปแปรรูปได้ง่าย อิเล็กโทรดเหล่านี้ถูกแบ่งออกเป็นหลายชนิด เช่น ของ AWS ชนิด ENi-CI, ENi-CI-A และของ JIS ชนิด DFCNi และถูกนำมาใช้สำหรับการเชื่อม เหล็กหล่อเทา เหล็กหล่ออบเหนียว หรือเหล็กหล่อเหนียว อย่างไรก็ตาม นิเกิลจะสามารถทำให้เกิดการแตกร้าวระหว่างการแข็งตัวได้ ซึ่งเนื่องมาจากการดึงซัลเฟอร์ หรือฟอสฟอรัสจากเหล็กหล่อเข้ามาในรอยเชื่อม ถ้าหากว่าธาตุเหล่านี้มีอยู่เป็นจำนวนมาก

#### 1.4.3.2 อิเล็กโทรดเหล็กนิเกิล

อิเล็กโทรดเหล็กนิเกิลถูกแบ่งตาม AWS คือชนิด ENiFe-CI, ENiFe-CI-A และของ JIS คือชนิด DFCNiFe ซึ่งนำมาใช้สำหรับการเชื่อมเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่ออบเหนียว และเหล็กหล่อเหนียว อิเล็กโทรดเหล่านี้จะมีราคาถูกกว่าอิเล็กโทรดนิเกิล และโลหะรอยเชื่อมที่ได้ก็จะมีโอกาสน้อยในการที่จะเกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัวที่มีสาเหตุมาจากฟอสฟอรัส หรือซัลเฟอร์โลหะรอยเชื่อมที่ได้นี้จะมีความแข็งและความแข็งแรงทางดัดสูงกว่าชนิดอิเล็กโทรดนิเกิล และด้วยเหตุนี้จึงมีความสามารถในการแปรรูปต่ำกว่าด้วย โลหะเติมชนิดนี้สามารถช่วยทำให้โลหะรอยเชื่อมมีการหดตัวทางความร้อนที่ต่ำ ซึ่งจะเป็นการช่วยป้องกันการแตกร้าวได้อย่างดี

#### 1.4.3.3 อิเล็กโทรดเหล็กละมุน

อิเล็กโทรดเหล็กละมุน เช่นของ AWS ชนิด Est, E 7018 และของ JIS ชนิด DFCFe ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการซ่อมแซมสิ่งบกพร่องขนาดเล็ก ๆ ของงานหล่อ ในที่ซึ่งต้องการให้มีการประสานเข้ากัน และการแปรรูปหลังการเชื่อมไม่มีความจำเป็นมากนัก เพราะว่าจะมีการเจือจางหรือการซึมเข้าของเหล็กหล่อที่เข้าไปในเนื้อโลหะเติม ซึ่งเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กละมุนนี้จะมีความสามารถในการแข็งตัวเพิ่มขึ้น

#### 1.4.3.4 อิเล็กโทรดนิเกิลทองแดง

อิเล็กโทรดชนิด ENiCu-A, ENiCu-B ของ AWS ชนิด DFCNiCu ของ JIS จะเป็นประเภทของอิเล็กโทรดนิเกิลทองแดง เนื้อโลหะเติมของอิเล็กโทรดเหล่านี้ จะมีความแข็งแรงทางดึงอยู่ในช่วงกลางระหว่างเนื้อโลหะเติมของอิเล็กโทรดนิเกิล และอิเล็กโทรดเหล็กนิเกิล อิเล็กโทรดชนิดนี้ช่วยให้มีการประสานเข้ากันที่ดีมากกับเหล็กหล่อ แต่ก็มีโอกาสที่จะเกิดการแตกร้าวจากสาเหตุการเจือจางเข้ามาของเหล็กหล่อและนอกจากนี้ยังมีความสามารถในการแปรรูปได้ดี

#### 1.4.3.5 อิเล็กโทรดทองแดงเป็นหลัก

อิเล็กโทรดทองแดง-คีนิก ถูกกำหนดขึ้นตาม AWS คือชนิด ECuSn-A และของ JIS ชนิด DCuSnA ส่วนอิเล็กโทรดทองแดง-อลูมิเนียม ถูกแบ่งตาม AWS ชนิด ECuA1-A2 และของ JIS ชนิด DCuA1 เนื้อโลหะเติมของอิเล็กโทรดเหล่านี้จะมีความต้านทานการแตกร้าว และมีความสามารถในการแปรรูปที่ดี แต่การประสานเข้ากันจะไม่ดีนัก อิเล็กโทรดเหล่านี้ไม่เป็นที่นิยมใช้เหมือนกับอิเล็กโทรดที่นิเกิลเป็นหลัก

#### 1.4.3.6 อิเล็กโทรดเหล็กหล่อ

ตามมาตรฐานของ JIS ได้กำหนดรายละเอียดของอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ เช่น DFCCI อยู่ในตารางที่ 1.5 เนื้อโลหะรอยเชื่อมของอิเล็กโทรดชนิดนี้จะมีส่วนผสมทางเคมีเกือบจะเช่นเดียวกับเหล็กหล่อ นั่นก็คือ เนื้อโลหะรอยเชื่อมนี้จะมีการประสานเข้ากันกับโลหะชิ้นงานได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม สมบัติทางกลของเนื้อโลหะรอยเชื่อมก็จะไม่ดีนัก และรอยเชื่อมก็มีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกร้าวขึ้นได้ เพราะว่าความเค้นจากการหดตัวเกิดขึ้นเมื่อรอยเชื่อมเย็นตัวลง ทั้งนี้ก็เมื่อโลหะรอยเชื่อมมีปริมาณซิลิกอนที่สูง เพื่อจำกัดการเกิดของยูเทคติกซีเมนไทต์ (eutectic cementite)

#### 1.4.4 เส้นลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมอาร์คก๊าซคลุม (GMAW)

เส้นลวดเชื่อม หรืออิเล็กโทรดเปลือย ก็คล้ายกับอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค (SMAW) ได้ถูกแนะนำอยู่ในตารางที่ 1.4 เช่นชนิดเหล็กกล้าคาร์บอน E705-2 ชนิดนิเกิล ERNi-1 ชนิดทองแดงเป็นหลัก ERCuAn-A และ ERCuA1-A2 สำหรับก๊าซคลุมในการเติมเส้นลวดเชื่อมก็ควรใช้ด้วย

### 1.5 วิธีดำเนินการเชื่อม (Welding Procedures)

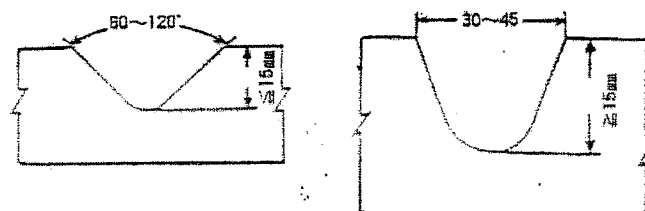
ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2 เหล็กหล่อทั้งหมดจะมีปัญหาไม่มากนักน้อยที่มีความสามารถในการเชื่อมไม่คืนกลับ เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กหล่อนั้น ดังนั้นในการทำงานเชื่อมจริง ๆ วิธีการดำเนินการเชื่อมที่เหมาะสมจึงควรถูกนำมาใช้ให้ครอบคลุมปัญหาเหล่านี้ด้วย

บทเรียนต่อไปนี้เป็นปัจจัยต่าง ๆ ที่สำคัญต่อการที่จะได้รับผลสำเร็จในการเชื่อมซ่อมแซมของเหล็กหล่อ โดยการเชื่อมก๊าซออกซิอะเซทิลีน และการเชื่อมโลหะแบบปกคลุมการอาร์คซึ่งเป็นกรรมวิธีที่ใช้กันทั่วไป

#### 1.5.1 การเตรียมร่องเชื่อม (Groove Preparation)

ในงานเชื่อมซ่อมแซมเหล็กหล่อต่าง ๆ ส่งบกพร่องทางงานหล่อ เช่น โพรงการหดตัว (Shrinkage cavity) ทรายฝังใน (sand inclusion) รูพรุน (porosity) รอยแตกร้าว เป็นต้น ควรที่จะกำจัดออกให้หมดโดยการกระทำทางกลที่เหมาะสม และร่องเชื่อมก็ควรเตรียมหรือทำขึ้นเพื่อให้ง่ายต่อการดำเนินการเชื่อม เมื่อจะทำการเตรียมร่องเชื่อมโดยการเซาะร่องด้วยอาร์ค (arc air gouging) จะต้องทำการอุ่นชิ้นงานเหล็กหล่อนั้นเสียก่อน และหลังจากเซาะแล้วก็เจียรนัยผิวหน้าของร่องเชื่อมเล็กน้อย

ตามรูปที่ 1.5 ร่องเชื่อมควรมีมุมร่อง (Groove angle) ใหญ่กว่ามุมร่องของเหล็กกล้า โดยมีรัศมีส่วนโค้งที่ส่วนล่างของร่อง ทั้งนี้ก็เพื่อจะทำได้ความสามารถในการทำงานที่ดีกว่า



รูปที่ 1.5 ตัวอย่างการเตรียมร่องเชื่อมสำหรับการเชื่อมซ่อมแซมงานหล่อที่บกพร่อง

ถ้าร่องเชื่อมมีคราบน้ำมันซึมซับอยู่ ก็จะต้องเช็ดผิวหน้าร่องเชื่อมด้วยพาราฟิน (parafin) แล้วเผาหรือใช้ไฟเผาให้น้ำมันที่ซึมซับอยู่นั้นถูกเผาออกไปหมด

### 1.5.2 การเลือกกรรมวิธีการเชื่อมและวัสดุงานเชื่อมสันเปลือย

การดำเนินการเชื่อมด้วยก๊าซออกซิอะเซทิลีน มีความต้องการปริมาณความร้อนเข้า (heat input) เป็นปริมาณที่สูงมาก ทั้งระหว่างการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อม และในระหว่างดำเนินการเชื่อม เพื่อที่จะทำให้ได้ผลสำเร็จที่ดีในการเชื่อมเหล็กหล่อ อุณหภูมิความร้อนที่สูงมากนี้จะแผ่ออกมาทำให้ช่างเชื่อมเกิดอันตรายได้ และนอกจากนี้ในส่วนของงานหล่อ เช่น การใช้เปลวไฟก็อาจจะทำไม่ได้ในการเผาหรืออุ่นขึ้นงานให้มีอุณหภูมิสูง และเมื่ออุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานไม่สามารถรักษาให้อยู่คงที่ตลอดทั่วทั้งงานหล่อ ก็อาจเกิดความเสี่ยงเนื่องจากอุณหภูมิเป็นเฉพาะที่ ซึ่งรอยแตกร้าวก็อาจจะเกิดขึ้นได้ นั่นก็คือ การเชื่อมก๊าซออกซิอะเซทิลีน ควรจะนำมาใช้งานกับชิ้นงานที่สามารถรักษาอุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมได้สูงพอที่อุณหภูมิคงที่ตลอดทั่วทั้งชิ้นงานหล่อนั้น

สำหรับการเชื่อมโลหะแบบปกคลุมการอาร์ค จะให้ปริมาณความร้อนที่แรงมากกว่าการเชื่อมก๊าซออกซิอะเซทิลีน นั่นก็คือ เราสามารถกระทำการเชื่อมด้วยการใช้หรือไม่ใช้ อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมที่ต่ำกว่าได้ โลหะเดิม หรืออิเล็กโทรดที่ใช้ก็คือชนิดนิเกิล นิเกิลเจือ หรือทองแดงเจือ อย่างไรก็ตามเมื่ออิเล็กโทรดที่ใช้เป็นชนิดเหล็กหล่อ หรือชนิดเหล็กผสมนิกเกิล การใช้ อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมก็จำเป็นต้องใช้ให้สูงขึ้นเช่นเดียวกับการเชื่อมก๊าซออกซิอะเซทิลีน เพื่อที่จะทำให้ได้ผลการเชื่อมที่สำเร็จเรียบร้อย การเชื่อมโลหะแบบปกคลุมการอาร์คมีข้อได้เปรียบอย่างเหนือกว่าการเชื่อมก๊าซดังนี้คือ

- ก. มีความเร็วในการเชื่อมสูงกว่า
- ข. มีการบิดตัวเนื่องจากการเชื่อมน้อยกว่า
- ค. เกิดบริเวณกระทบร้อนแคบกว่าจึงมีโอกาสดังกล่าวได้น้อยกว่า
- ง. มีความเป็นไปได้ที่จะใช้อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อน เชื่อมที่ต่ำกว่าหรือไม่ต้องมีการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อม ซึ่งจะมีประโยชน์เป็นพิเศษในการที่จะทำการเชื่อมงานที่มีมวลแตกต่างกัน ในส่วนที่มีความหนาจนถึงส่วนที่บาง

อย่างไรก็ตาม การซึมลึกที่มากกว่าของการเชื่อมโลหะแบบปกคลุมการอาร์คก็อาจจะ เป็นผลเสียได้ในเรื่องของการเงาาง หรือแทรกซึมของเหล็กหล่อจึงควรจะมีน้อยที่สุด นั่นก็คือควรจะใช้อิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็กกลงเพราะว่า กระแสไฟที่ต่ำกว่าสามารถที่จะใช้ได้ในงานเชื่อม

ในการเลือกใช้วัสดุงานเชื่อมสลับเปลี่ยน หรืออิเล็กทรอนิกส์มีปัจจัยหลายอย่างที่จะต้องนำมาพิจารณา คือ การประสานเข้ากันกับโลหะชิ้นงาน ความสามารถในการแปรรูปของเนื้อรอยเชื่อม สมบัติทางกลของรอยเชื่อม รวมทั้งความสามารถในการทำงานด้วย

### 1.5.3 การอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม

ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 1.2.1 การเกิดบริเวณกระทบร้อนที่แข็งและเปราะ อาจจะเป็นตัวทำให้เกิดการแตกร้าวในระหว่างการเย็นตัวหรือในการใช้งาน ความแข็งของบริเวณกระทบร้อนสามารถที่จะกำจัดไปได้ โดยการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม เนื่องจากการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมทำให้มีอัตราการเย็นตัวช้าลงทั้งบริเวณเนื้อโลหะรอยเชื่อมและที่บริเวณกระทบร้อน อัตราการเย็นตัวที่ช้าลงนี้สามารถสกัดกั้นการเกิดเหล็กคาร์ไบด์ และมาร์เทนไซต์ซึ่งจะช่วยลดความแข็งของรอยเชื่อม

อุณหภูมิและขอบเขตของการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม จะขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กหล่อที่จะทำการเชื่อม มวลของงานหล่อ กรรมวิธีในการเชื่อม และชนิดของโลหะเติม ข้อแนะนำสำหรับอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม และอุณหภูมิระหว่างเปลี่ยนเทียวยเชื่อมของโลหะ ชิ้นงาน เหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียว ถูกกำหนดไว้ในตารางที่ 1.8 ซึ่งจะสัมพันธ์กับกรรมวิธีการเชื่อม และชนิดของโลหะเติม

ตารางที่ 1.8 ข้อแนะนำอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมและเปลี่ยนเทียวยเชื่อม

ชนิดของวิธีดำเนินการ	กรรมวิธีการเชื่อม ชนิดของโลหะเติม	การเชื่อมก๊าซ ออกซิอะเซทีลีน	การเชื่อมโลหะแบบ ปกคลุมการอาร์ค
การอุ่นชิ้นงานก่อน เชื่อมใช้อุณหภูมิสูง	CI, RCI RCI-A CID, RCI-B	400 ~ 600 °ซ	500 ~ 600 °ซ
	CFCCI DFCFE, ESt	-	500 ~ 600 °ซ
การอุ่นชิ้นงานก่อน เชื่อมใช้อุณหภูมิต่ำ	DFCFE	-	*300 ~ 400 °ซ
	DFCNIFe ENiFe-CI	-	150 ~ 300 °ซ
	DFCNI ENiCI	-	100 ~ 300 °ซ

\* สำหรับอิเล็กทรอนิกส์ชนิดคาร์บอนต่ำ DFCFE เช่น CIA-3 ของ บริษัท โอบัสตีล

การแตกร้าจากการขยายตัวที่ไม่เสมอภาคกันอาจจะเกิดขึ้นระหว่างกระทำการอุ่นขึ้นงานก่อนการเชื่อมของงานหล่อที่มีรูปร่างซับซ้อน หรือจากการอุ่นขึ้นงานกระทำที่บริเวณเล็ก ๆ ของงานหล่อขนาดใหญ่ การอุ่นขึ้นงานเฉพาะที่ควรจะทำอย่างช้า ๆ หรือเพิ่มขึ้นทีละน้อย การอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมตรงส่วนใหญ่กว่าของงานหล่อที่จะทำการเชื่อมหรือพื้นที่ทั้งหมดของงานหล่อโดยใช้ความร้อนที่สม่ำเสมอเป็นข้อแนะนำให้ใช้ก่อนการเชื่อม

ในกรณีต่าง ๆ อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมนี้ ควรที่จะให้คงอยู่จนถึงในระหว่างการเชื่อมและการเชื่อมควรที่จะทำให้สมบูรณ์ก่อนที่งานหล่อนี้จะเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง

#### 1.5.4 วิธีการเติมเนื้อโลหะรอยเชื่อม (Deposition methods)

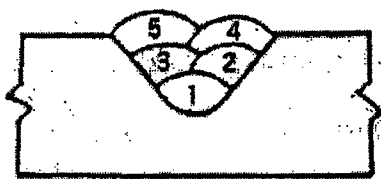
##### 1.5.4.1 วิธีดำเนินการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมด้วยอุณหภูมิสูง

ในวิธีดำเนินการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมด้วยอุณหภูมิสูงนี้จะนิยมใช้การเชื่อมแบบต่อเนื่องด้วยโลหะเติมที่ใหญ่โดยใช้วิธีการเคลื่อนอิเล็กโทรดแบบส่าย (Weaving manipulation) เพราะว่าการให้ความร้อนเข้า (heat input) ที่สูงกว่าจะให้ผลดีในการที่อัตราการเย็นตัวของรอยเชื่อมจะช้าลง อย่างไรก็ตาม การให้ความร้อนที่มากเกินไปควรที่จะหลีกเลี่ยงเพื่อป้องกันการแตกร้า

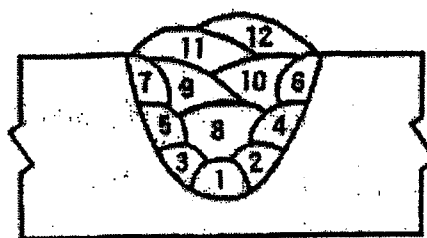
##### 1.5.4.2 วิธีดำเนินการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมด้วยความร้อนต่ำ

วิธีการต่อไปนี้ ควรจะนำมาใช้ในการที่ใช้การอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมด้วยอุณหภูมิต่ำ เพื่อที่จะทำให้มีบริเวณกระทบร้อนน้อยที่สุด เกิดความเค้นเนื่องจากความร้อนน้อยที่สุด และป้องกันการแตกร้า

- 1) เติมเนื้อโลหะด้วยตะขีบเชื่อมที่สั้น ในเมื่อความยาวตะขีบเชื่อมมีความยาวถึง 30 หรือ 50 มม.
- 2) ใช้กระแสไฟเชื่อมต่ำ ๆ และอิเล็กโทรดขนาดเล็ก
- 3) วางตะขีบเชื่อมให้อยู่ในแนวเส้นตรง อย่างไรก็ตาม การส่ายอิเล็กโทรด ควรจะถูกจำกัดให้มีความกว้างของการส่ายประมาณ 1.5 เท่าของขนาดอิเล็กโทรด
- 4) ทำการเชื่อมหลายชั้นเชื่อม (multi pass) สำหรับรอยเชื่อมที่หนา ส่วนการเชื่อมคลุมผิว (buttering) ควรจะนำมาใช้เมื่อต้องการใช้เทียวยเชื่อมหรือชั้นเชื่อมจำนวนมาก เพื่อที่จะทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิการเชื่อมน้อยที่สุด และป้องกันการแตกร้าของรอยเชื่อมและบริเวณกระทบร้อนด้วย สำหรับการเชื่อมคลุมผิวนี้ ควรใช้อิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็กลง เพื่อที่จะทำให้มีความร้อนเข้าสู่โลหะขึ้นงานน้อยที่สุด ดังรูปที่ 1.9



ก) การเติมเนื้อโลหะหลายทีวยเชื่อม



ข) การเติมเนื้อโลหะหลายทีวยเชื่อม  
ด้วยการเชื่อมคลุมผิว (1-7 ทีวยเชื่อม)

รูปที่ 1.9 การเติมเนื้อโลหะหลายชั้นเชื่อม สำหรับรอยเชื่อมที่หนา

### 1.5.5 กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมและการพีนิง

(Postweld heat treatment and peening)

#### 1.5.5.1 วิธีดำเนินการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมด้วยอุณหภูมิสูง

หลังจากการเชื่อมได้กระทำผ่านไปแล้วในทันทีทันใดนั้น งานเชื่อมควรจะถูกระทำให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ โดยมักจะใส่งานเชื่อมในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ  $500\sim 600^{\circ}\text{C}$  แล้วก็ให้เย็นตัวลงภายในเตานั้นเอง หรือว่าปกคลุมงานเชื่อมด้วยวัสดุทนความร้อน (insulating blanket) ไคอะโตไมท์ (diatomite) ขี้เถ้า หรือทรายร้อน การทำให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ นี้ ก็เพื่อป้องกันความเค้นเนื่องจากความร้อนและการแตกร้าว การอบอ่อน (annealing) ควรจะนำมาใช้เมื่อมีความจำเป็นต้องขจัดความเค้นตกค้างของงานเชื่อม ตารางที่ 1.9 ให้ข้อแนะนำการอบอ่อน เหล็กหล่อ ส่วนการอบอ่อนเต็มที (full annealing) ถูกนำมาใช้ก็เพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของงานเชื่อมให้ดีขึ้นรวมทั้งการกำจัดความเค้นตกค้างด้วย

การพีนิงจะไม่ถูกนำมาใช้กับวิธีการดำเนินการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมด้วย

อุณหภูมิสูง









ตารางที่ 1.9 ข้อเสนอแนะในการอบอ่อน (WES 7104-86)

การอบอ่อนชนิด ความเค้นคงเหลือ	550~600 °ซ x 1.5 ชม. / 25 มม.	เย็นตัวในเตาจนถึง 300 °ซ ประมาณ 50 °ซ
การอบอ่อนเต็มที่	800~900 °ซ x 1 ชม. / 25 มม.	ต่อ 1 ชม. แล้วจึงให้ เย็นตัวในอากาศ

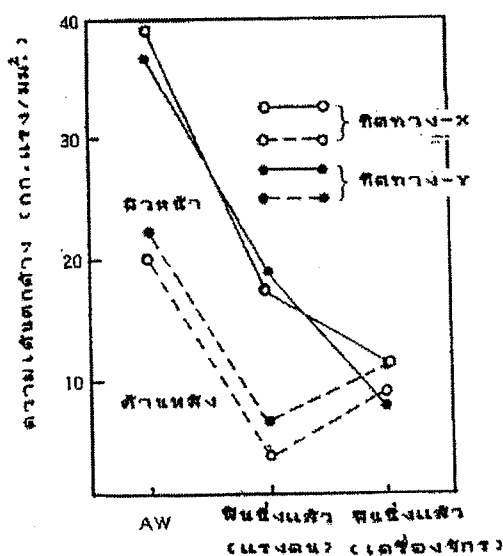
#### 1.5.5.2 วิธีดำเนินการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมด้วยอุณหภูมิต่ำ

ในทันทีที่ทำการเชื่อมผ่านไปในแต่ละเที่ยวเชื่อมจะต้องทำการเคาะตะกรันออกแล้วทำการพินึงในแต่ละช่วงสั้น ๆ ของตะเข็บเชื่อมในขณะที่ยังร้อนอยู่โดยการใช้ค้อนสำหรับพินึงทำการเคาะรอยเชื่อมด้วยมือหรือใช้เครื่องเฉพาะเชิงกลก็ได้ การพินึงตะเข็บเชื่อมที่ยังร้อนอยู่นี้จะช่วยลดความเค้นจากการเชื่อม และป้องกันการแตกร้าวโดยการให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (plastic deformation) การพินึงควรจะทำซ้ำ ๆ กันด้วยการตีแรงปานกลางโดยใช้ค้อนหัวกลมหรือหัวสี่เหลี่ยมในที่ที่ซึ่งตะเข็บเชื่อมมีผิวหน้าที่ถี่ และการใช้แรงที่เหมาะสมเพื่อเปลี่ยนแปลงรอยเชื่อมต้องทำให้ตลอดจนกระทั่งผิวคลื่นของรอยเชื่อมถูกกำจัดออกทั้งหมด แต่จะต้องไม่ให้รอยเชื่อมเกิดการแตกร้าว รูปที่ 1.10 แสดงตัวอย่างของรูปร่างที่หัวของค้อนพินึง

เส้นรอบรูปของหัวค้อน	ขนาด (มม.)
	5" x 10R
	7" x 10R
	10" x 7R
	4 x 8 x 7R
	6 x 14 x 7R
	8 x 16 x 7R

รูปที่ 1.10 ตัวอย่างของเส้นรอบรูปของหัวค้อนพินึง

รูปที่ 1.11 แสดงตัวอย่างของผลการพินึงต่อความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นจากการเชื่อม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความเค้นตกค้างสามารถที่จะลดลงได้



รูปที่ 1.11 ผลของการพินึงต่อความเค้นตกค้างของงานเชื่อม

รูปที่ 1.11 (ต่อ) โลหะชิ้นงาน : FC-25, หนา 30 x 150 x 200  
อุณหภูมิอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม : 100 °ซ  
โลหะเติม : DFCNiFe

วิธีดำเนินการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมด้วยอุณหภูมิต่ำ จะถูกนำมาใช้ในการเชื่อมซ่อมแซมชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ๆ ยากที่จะนำพาชิ้นงานเพื่อการเชื่อมหรือการทำการกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม หรือใช้กับชิ้นงานที่ยังอยู่ในระหว่างการใช้งาน

นั่นก็คือ กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมไม่ได้ถูกกระทำโดยทั่วไป อย่างไรก็ตาม ถ้าเป็นไปได้ การอบอุ่นก็ถูกแนะนำให้กระทำเพื่อที่จะกำจัดความเค้นและความเครียดตกค้าง และทำให้งานเชื่อมที่แข็งนั้นอ่อนลง การอบอุ่นนั้นดูที่หัวข้อที่ 1.5.5.1

#### 1.5.6 การใส่สลักและการใช้เหล็กเกาะยึด (Studding and Cramping)

ในการเชื่อมซ่อมแซมเหล็กหล่อ บางครั้งก็เป็นการยากที่จะขจัดน้ำมันที่ซึมซับอยู่ในร่องเชื่อม ในบางกรณีก็จะมีเกิดการเกิดออกไซด์ข้างในงานหล่อซึ่งจะแทรกตัวออกมาในที่อุณหภูมิสูง งานหล่อเหล่านี้จะมีความสามารถในการเชื่อมที่ต่ำมาก และในที่ซึ่งมวลของรอยเชื่อมมีขนาดใหญ่ก็

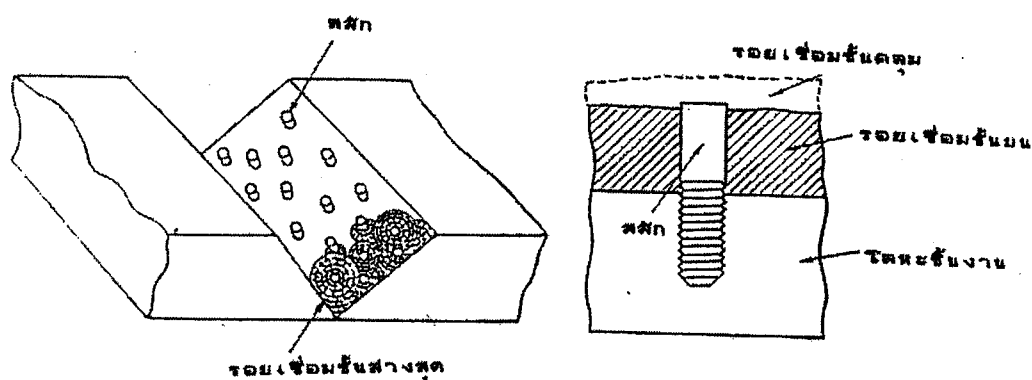
จะเกิดการแตกร้าว และการไม่เกาะยึดกันเพราะว่าเกิดความเค้นจากความร้อนที่มากเกินไปและความเค้นจากการหดตัว ในกรณีเหล่านี้ รอยเชื่อมจะถูกเสริมด้วยการใส่สลักและการใช้เหล็กเกาะ

#### 1.5.6.1 การใส่สลัก

ตามรูปที่ 1.12 สลักเหล็กกล้าคาร์บอนถูกยึดโดยการขันเกลียวเข้าไปในร่องของงานหล่อ การเชื่อมจะเริ่มดันขึ้นที่สลักแต่ละตัว และกระจายออกรอบ ๆ แท่งสลักนั้นเพื่อให้เต็มพื้นที่ที่ไม่มีสลัก และในที่สุดแท่งสลักทั้งหมดก็จะถูกปกคลุมด้วยเนื้อโลหะเดิม ภายใต้ที่บริเวณรอยเชื่อมที่ถูกหลอมละลาย และการแตกร้าวในรอยเชื่อมและช่วยให้รอยต่องานเชื่อมมีความแข็งแรง

ในวิธีดำเนินการเชื่อมแบบนี้ วัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองหรืออิเล็กทรอนิกส์ถูกนำมาใช้ก็คือ ชนิดเหล็กกลมมน ชนิดเหล็กหล่อ ชนิดนิกเกิล และชนิดนิกเกิลเจือ

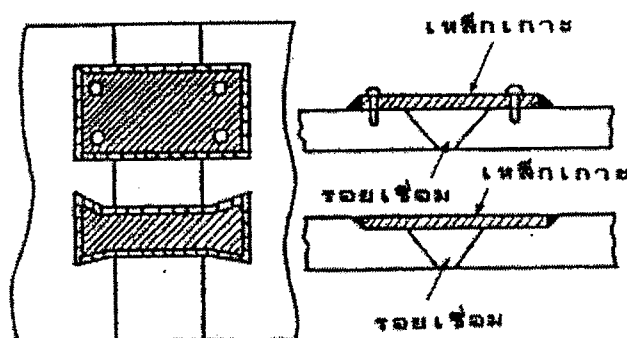
สำหรับการนำไปใช้งานของวิธีดำเนินการเชื่อมแบบนี้ ตัวอย่างก็คือ การเชื่อมซ่อมแซมแท่งอินกอต (ingot)



รูปที่ 1.12 การเชื่อมซ่อมแซมโดยการใส่สลัก

#### 1.5.6.2 การใช้เหล็กเกาะ

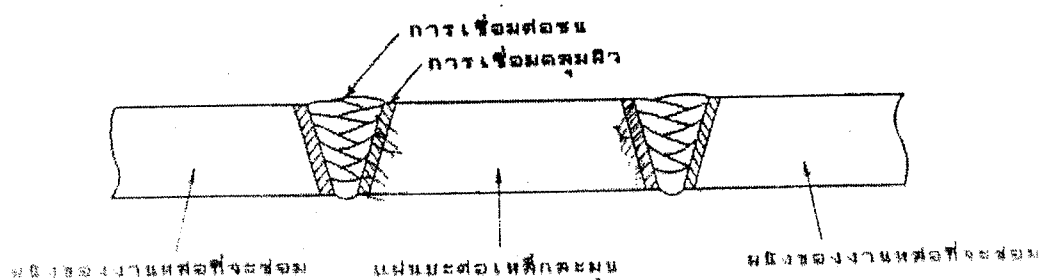
ตามรูปที่ 1.13 แผ่นเหล็กกล้าหรือแท่งเหล็กกล้าจะถูกยึดติดเพื่อให้รอยต่องานเชื่อมเกาะยึดไว้ ซึ่งจะเป็นการป้องกันการไม่ยึดเกาะติดกันที่บริเวณรอยเชื่อมที่ถูกหลอมละลาย และป้องกันการแตกร้าวในรอยเชื่อม และยังทำให้รอยต่องานเชื่อมมีความแข็งแรงขึ้นด้วย วิธีดำเนินการเชื่อมแบบนี้ถูกนำไปใช้บ่อย ๆ ในการซ่อมแซมรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อขนาดใหญ่



รูปที่ 1.13 การเชื่อมซ่อมแซมโดยใช้เหล็กเกาะ

#### 1.5.7 การปะต่อ (Patching)

งานหล่อที่มีการแตกร้าวหลาย ๆ ทิศทาง หรือชิ้นส่วนของผนังขาดหายไปจะถูกซ่อมแซมโดยใช้วิธีการปะต่อ ในวิธีการนี้ บริเวณที่มีส่วนบกพร่องจะถูกตัดทิ้งไป และแผ่นปะต่อที่เป็นเหล็กกล้าก็จะถูกนำมาเชื่อมต่อในตำแหน่งนั้น ตามที่แสดงในรูปที่ 1.14 ตัวอย่างของการใช้วิธีการนี้ก็คือ การซ่อมแซมกระบอกสูบของเครื่องยนต์ที่ถูกทำให้เกิดความเสียหายจากก้านลูกสูบที่แตกหัก



รูปที่ 1.14 ภาพตัดขวางของการปะต่อ

## บทที่ 2

### การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมและสมบัติของรอยเชื่อมต่อ

#### (Welding of Austenitic Stainless Steel and Properties of Welded joints)

#### 2.1 การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติก (Welding of Austenitic Stainless Steel)

ปัญหาหลักที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติก คือ

- 1) การบิดตัวที่มีสาเหตุมาจากการเชื่อม
- 2) การแตกร้าวของโลหะรอยเชื่อม
- 3) การกัดกร่อนที่ขอบเกรนใน HAZ (รอยเชื่อมเสื่อมลง และเกิดเส้นคมมีด) (Knife line) ขึ้นที่เหล็กกล้าไร้สนิมเสถียรภาพ
- 4) การแตกร้าวจากความเค้นกัดกร่อน

##### 2.1.1 การบิดตัวที่มีสาเหตุมาจากการเชื่อม (Distortion Caused by Welding)

การบิดเบี้ยวของโลหะเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนเข้า (heat input) ในการเชื่อม ดังที่แสดงใน ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติในการนำความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติกมีค่าประมาณ 1/3 ของเหล็กคาร์บอน ในขณะที่สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความร้อนมีค่าประมาณ 1.5 เท่า มากกว่าเหล็กคาร์บอน ด้วยเหตุนี้การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติกอาจจะเป็นสาเหตุให้เกิดการบิดตัวได้มากกว่า นี่ก็หมายความว่าควรมีมาตรการที่เหมาะสมเป็นพิเศษในการป้องกันการบิดตัวจากการเชื่อม เมื่อทำการเชื่อมโลหะแผ่นบางหรือในการเชื่อมผลิตภัณฑ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง

เพื่อที่จะป้องกันการบิดตัวจากการเชื่อม การใช้จิกยึดงานและการให้บริเวณรอยเชื่อมเย็นลงอย่างรวดเร็วโดยใช้แผ่นทองแดงประกบที่ด้านหลังก็เป็นที่ยอมรับกันอย่างมาก การใช้ลำดับการเชื่อมแบบสมมาตร (Symmetrical sequence) ลำดับการเชื่อมแบบเคลื่อน (Wandering sequence) หรือลำดับการเชื่อมก้าวถอย (back-step sequence) ก็มีผลต่อการป้องกันการบิดตัวในการเชื่อมด้วยเช่นกัน ในวิธีการต่าง ๆ เหล่านี้ ลำดับในการเชื่อมจะถูกปรับเปลี่ยนตามการกระจายตัวของความร้อนให้สม่ำเสมอ ดังนั้นก็จะหลีกเลี่ยงการรวมตัวของความเค้นทางความร้อนที่มีสาเหตุจากการเชื่อม

ในการเชื่อมแฉก (tack welding) ของเหล็กกล้าไร้สนิม ระยะของการเชื่อมแฉกควรสั้นกว่าระยะของเหล็กกล้าคาร์บอน ระยะดังกล่าวควรจะเป็น 20-25 เท่าของความหนาของแผ่นชิ้นงานที่จะทำการเชื่อม

### 2.1.2 การแตกร้าวร้อน (Hot cracking)

การแตกร้าวที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติกก็คือการแตกร้าวร้อนที่เกิดขึ้นตามขอบเกรนออสเทนไนติกหรือที่ขอบผลึกเสาเข็ม (columnar crystal) ตรงบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นที่โลหะรอยเชื่อมเปลี่ยนจากของเหลวเป็นของแข็ง

มาตรการที่มีผลมากที่สุดที่ใช้ในการป้องกันการแตกร้าวร้อนก็คือเติมเฟอร์ไรต์จำนวนมาก ๆ ลงในโลหะรอยเชื่อม แต่เติมวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลือง เช่น 308, 316 และ 347 จะมีเฟอร์ไรต์ผสมอยู่ในโลหะรอยเชื่อม ดังแสดงในภาพถ่ายที่ 2.1 และสามารถที่จะป้องกันการแตกร้าวร้อนได้อย่างผลดี เมื่อทำการเชื่อมในลำดับขั้นตอนการเชื่อมปกติ

การที่มีเฟอร์ไรต์อยู่ในโลหะรอยเชื่อมนี้ไม่เพียงจะเพิ่มการต้านทานการแตกร้าวร้อนเท่านั้น แต่ยังมีผลในการต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติทางกลของโลหะรอยเชื่อมอีกด้วย โดยทั่วไปแล้วการควบคุมปริมาณของเฟอร์ไรต์ให้เหมาะสมจะเป็นความจำเป็นที่สำคัญมาก ๆ

ผลของเฟอร์ไรต์ต่อการแตกร้าวร้อนระหว่างการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติก วิธีการวัดเฟอร์ไรต์ และอิทธิพลของสิ่งแปลกปลอมจะถูกอธิบายดังต่อไปนี้

#### 2.1.2.1 ผลของเฟอร์ไรต์ (Effects of ferrite)

ปริมาณของเฟอร์ไรต์ที่จำเป็นต่อการป้องกันการแตกร้าวร้อนแปรเปลี่ยนไปตามชนิดต่าง ๆ ของเหล็กกล้า แต่เฟอร์ไรต์ที่มีอยู่แล้วก็จะมีผลต่อการป้องกันการแตกร้าว ดังที่บ่งชี้ในผลการทดสอบการดัดโค้งรอยแยก WRC ดังแสดงในรูปที่ 2.1

อาจจะมีเหตุผลหลายอย่างที่ทำให้เฟอร์ไรต์จึงมีผลในการป้องกันการแตกร้าวร้อน เหตุผลหนึ่งที่เชื่อถือได้ก็คือถ้าเฟอร์ไรต์ถูกผสมอยู่ในโลหะรอยเชื่อม เฟสเคลด้าเฟอร์ไรต์ที่ตกผลึกเริ่มแรก ดังแสดงใน c) และ d) ของรูปที่ 2.2 ในกระบวนการแข็งตัว เพราะว่าเฟสเคลด้าเฟอร์ไรต์นี้จะละลายได้ง่ายกับสิ่งแปลกปลอม เช่น ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) ซึ่งสามารถเกิดโลหะผสมที่มีจุดหลอมละลายต่ำ ๆ การแตกตามเกรนของธาตุเจือปนแปลกปลอมก็จะลดน้อยลง และความต้านทานในการแตกร้าวก็เพิ่มขึ้น

ในอีกแง่หนึ่ง ถ้าเฟสออสเทนไนติกตกผลึกเริ่มแรกในกระบวนการการแข็งตัว ดังที่แสดงใน a) และ b) ของรูปที่ 2.2 การแตกตามเกรนของฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์ก็จะเกิดขึ้นสูง และเป็นผลทำให้มีความไวในการแตกร้าวก็เพิ่มขึ้น

ปริมาณเฟอร์ไรต์ในโลหะรอยเชื่อมอาจจะแปรเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขในการเชื่อมดังตัวอย่างเช่น ถ้าระยะอาร์คยาวมากในการเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค การสิ้นเปลืองของโครเมียม (ธาตุที่เป็นส่วนของเฟอร์ไรต์) และธาตุเจืออื่น ๆ จากการรวมตัวกับออกซิเจนหรือผสมกับ

ไนโตรเจนในอากาศ (ธาตุที่เป็นส่วนของออสเตนไนท์) จะไปลดปริมาณเฟอร์ไรท์ในโลหะรอยเชื่อม และเป็นผลให้เพิ่มความไวในการแตกร้าวร้อน

ในการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุมหรือกรรมวิธีการเชื่อมอื่น ๆ ที่มีการซึมลึกที่มาก โลหะรอยเชื่อมจะมีผลอย่างมากจากส่วนผสมของโลหะขึ้นงานและบางทีก็นำไปสู่การลดปริมาณเฟอร์ไรท์ในโลหะรอยเชื่อม เมื่อจะใช้กรรมวิธีการเชื่อมที่ได้การซึมลึกที่ใหญ่ขึ้น ก็ใช้ฟลักซ์แบบผ่านการเผาตะกั่ว (Sintered flux) ซึ่งทำให้การปรับธาตุเจือได้ดีมากกว่าการใช้ฟลักซ์แบบหลอมละลาย (fused flux) สำหรับการลดการแตกร้าวร้อน

#### 2.1.2.2 วิธีการวัดปริมาณเฟอร์ไรท์ (Ferrite Amount Measuring Method)

ปริมาณของเฟอร์ไรท์ในโลหะรอยเชื่อมถูกวัดได้โดยวิธีการดังต่อไปนี้

a) ใช้อุปกรณ์แม่เหล็ก เฟอร์ไรท์มีสมบัติเป็นแม่เหล็ก ส่วนออสเตนไนต์ไม่เป็นสารแม่เหล็ก คุณลักษณะนี้ถูกใช้สำหรับวัดปริมาณเฟอร์ไรท์ในเหล็กกล้าโดยการใช้อุปกรณ์แม่เหล็ก ปัจจุบันนี้อุปกรณ์ที่ใช้วัดก็คือ เครื่องบ่งชี้เฟอร์ไรท์ (วิธีการเปรียบเทียบแรงแม่เหล็ก) เกจแม่เหล็ก (วิธีการวัดฟิล์ม) และเฟอร์ไรท์สโคป (วิธีการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก)

b) วิธีการแผนภูมิของเฟส (Phase diagram method) นิเกิลสุมคูลและโครเมียมสุมคูลย์ของโลหะรอยเชื่อม จะถูกคำนวณ และปริมาณของเฟอร์ไรท์ก็จะได้จากแผนภูมิของเฟส แผนภูมิของเฟสที่ใช้กับจุดประสงค์นี้บ่อย ๆ ก็คือแผนภูมิของเชฟเฟอร์ (Schaeffler's diagram) ซึ่งแสดงในรูปที่ 3 และแผนภูมิของเดลลอง (Delong's diagram)

c) วิธีการใช้กล้องขยาย (Microscope method) ปริมาณของเฟอร์ไรท์หาได้จากเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ของออสเตนไนท์ และเฟอร์ไรท์ในโครงสร้างจุลภาค

จากที่อธิบายมาข้างต้นนี้ ปริมาณของเฟอร์ไรท์สามารถวัดได้หลายวิธีและค่าที่วัดได้อาจจะแปรเปลี่ยนไปตามแต่วิธีการที่ใช้ เมื่อทำการวัดปริมาณเฟอร์ไรท์ให้ถูกต้องแน่นอนจึงจำเป็นที่จะต้องเข้าใจอย่างดีถึงคุณลักษณะของวิธีการวัดในแต่ละวิธี และเลือกวิธีการอย่างหนึ่งที่เหมาะสมที่สุดกับจุดประสงค์ของเรา

ปริมาณของเฟอร์ไรท์จะแสดงออกมาในรูปของเปอร์เซ็นต์ (%) เฟอร์ไรท์ และก็ถูกบ่งชี้เป็นเฟอร์ไรท์นัมเบอร์ (ferrite number ; FN) ด้วย ซึ่งจะแสดงปริมาณเฟอร์ไรท์ที่สัมพันธ์กับค่ามาตรฐานที่แน่นอน วิธีการวัดปริมาณเฟอร์ไรท์ใน FN แบ่งเป็นสองชนิดคือ วิธีการแม่เหล็กและวิธีการใช้แผนภูมิของเฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งแผนภูมิของเฟสในรูปที่ 2.4 นี้มีพื้นฐานเช่นเดียวกับแผนภูมิของเดลลอง

### 2.1.2.3 อิทธิพลของธาตุแปลกปลอม (Influency of impurity elements)

ความไวต่อการแตกร้าวร้อนของโลหะรอยเชื่อมก็ถูกอิทธิพลของธาตุแปลกปลอม เช่น ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ โบรอน เป็นต้น ซึ่งง่ายต่อการเป็นสารผสมที่มีจุดหลอมละลายต่ำ

รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของฟอสฟอรัส + ซัลเฟอร์ ที่มีต่อความไวในการแตกร้าวร้อนของโลหะรอยเชื่อมชนิด 309 การลดลงของปริมาณฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์เป็นผลในการเพิ่มความต้านทานการแตกร้าวร้อน แม้ว่าปริมาณของเฟอร์ไรท์จะต่ำ ลวดเชื่อมอนุกรม 310 และชนิด ออสเตนไนติกจะมีปริมาณของฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์ที่ต่ำมาก และปริมาณซิลิกอนก็ถูกลดลงเพื่อจำกัดการเกิดของสารผสมที่มีจุดหลอมละลายต่ำ นั่นก็คือ เป็นการรักษาระดับของความต้านทานการแตกร้าวให้สูงขึ้น

การลดลงของการแตกร้าวร้อนยังมีผลมาจากการเพิ่มปริมาณธาตุมังกานีสที่สามารถคงปริมาณของซัลเฟอร์โดยการไปรวมตัวกับซัลเฟอร์เป็นมังกานีสซัลไฟด์ (MnS)

### 2.1.3 ความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance)

#### 2.1.3.1 การแตกร้าวตามเกรน

##### a) รอยเชื่อมเสื่อมลง (Weld decay)

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนไนติกที่ผ่านกรรมวิธีการรีดมาแล้วจะถูกทำกรรมวิธีทางความร้อนด้วย และโครงสร้างจุลภาคของโลหะชิ้นงานแสดงโครงสร้างที่ผ่านการรีดมาในเฟสของออสเตนไนท์เดี่ยว ตรงกันข้ามกับสิ่งนี้ บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ประกอบด้วยพื้นที่สองแห่งที่แตกต่างกัน บริเวณส่วนที่ละลาย (solution part) ได้รับความร้อนถึง 1000 °ซ. หรือมากกว่านี้ และบริเวณส่วนที่คาร์ไบด์ตกผลึก (carbide crystallized) ได้รับความร้อน 500° ถึง 800 °ซ. ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.6

ความสามารถในการละลายตัวของคาร์บอนในโลหะชิ้นงานจะลดลงอย่างมากที่อุณหภูมิต่ำกว่าประมาณ 900 °ซ. โลหะชิ้นงานซึ่งถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วในกระบวนการละลายตัวของของแข็งจะมีคาร์บอนอยู่ในสถานะของแข็งที่ไม่คงตัว (unstable)

ในขอบเขตที่ได้รับความร้อนที่ 500 °ซ - 600 °ซ. โดยความร้อนจากการเชื่อม (บริเวณคาร์ไบด์ตกผลึก ในรูปที่ 2.6) คาร์บอนจะผสมกับโครเมียมซึ่งมีความเกี่ยวพันกันมาก และโครเมียมคาร์ไบด์จะตกผลึกคงตัวในของเกรนออสเตนไนท์

การที่โครเมียมคาร์ไบด์ตกผลึกตามขอบเกรนก็ทำให้ปริมาณโครเมียมลดลงรอบ ๆ ขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ชั้นที่มีโครเมียมต่ำตามขอบเกรนนี้ก็จะทำให้เกิดการกัดกร่อนและปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่ารอยเชื่อมเสื่อมลง



การขยายตัวของการกัดกร่อนตามเกรนเป็นผลมาจากปริมาณคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และยังได้รับอิทธิพลมาจากอุณหภูมิการให้ความร้อนกับเวลาในการให้ความร้อน และการกัดกร่อนตามเกรนจะเกิดขึ้นในระยะเวลาสั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีอุณหภูมิประมาณ  $700^{\circ}\text{C}$ .

ในบริเวณกระแทกร้อน (HAZ) ของโลหะขึ้นงาน มีพื้นที่กว้างที่จะเกิดการกัดกร่อนตามเกรน เมื่อความร้อนเข้าของการเชื่อมเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งก็หมายความว่า ความร้อนเข้าจากการเชื่อมมีปริมาณมาก ก็จะทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนตามเกรนของบริเวณกระแทกร้อนด้วยลงอย่างมาก ในการเชื่อมแบบหลายชั้นเชื่อมของขึ้นงานที่หนาบริเวณ HAZ ก็จะได้รับความร้อนซ้ำ ๆ กันตลอด และจากที่กล่าวถึงข้างต้น กรณีของการเชื่อมชั้นเชื่อมเดียวความร้อนเข้าไม่สามารถทำให้มีอิทธิพลต่อความต้านทานการกัดกร่อนของกรรมวิธีการเชื่อมนี้

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขต่าง ๆ เหล่านี้ มาตรการต่อไปนี้จะปฏิบัติเพื่อลดการกัดกร่อนตามเกรนในบริเวณกระแทกร้อน

a) กรรมวิธีการละลายของแข็ง (solid solution) ที่  $1000^{\circ}\text{C}$ - $1150^{\circ}\text{C}$  ควรจะกระทำเมื่อการเชื่อมสมบูรณ์แล้ว ดังนั้นการเกิดขึ้นของโครเมียมคาร์ไบด์ระหว่างการเชื่อมก็สามารถหลีกเลี่ยงได้

b) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เช่น ชนิด 304L และชนิด 316L หรือเหล็กกล้าที่คงตัวเช่น ชนิด 347 ควรผสมไนโอเบียมหรือธาตุอื่น ๆ ที่สามารถเกิดคาร์ไบด์ได้ง่ายมากกว่าโครเมียม

c) ควรลดความร้อนเข้าจากการเชื่อมลง หรือใช้ระบบการเย็นตัวลง โดยใช้น้ำระหว่างการเชื่อมเพื่อเพิ่มอัตราการเย็นตัว ดังนั้นช่วงอุณหภูมิตั้งแต่  $500^{\circ}\text{C}$  ถึง  $800^{\circ}\text{C}$  สามารถที่จะผ่านไปได้อย่างรวดเร็วเท่าที่จะทำได้

โลหะรอยเชื่อมมีการกระจายตัวอย่างดีของเฟอร์ไรต์ ซึ่งมีโครเมียมมาก ด้วยเหตุนี้ชั้นที่มีโครเมียมน้อยถูกทำให้เกิดขึ้นภายในได้ยาก ดังนั้นโลหะรอยเชื่อมจะมีความต้านทานการกัดกร่อนตามเกรนมากกว่าโลหะขึ้นงาน

รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของเฟอร์ไรต์ในโลหะรอยเชื่อมมีอิทธิพลต่อความต้านทานการกัดกร่อนตามเกรนอย่างไร เมื่อปริมาณเฟอร์ไรต์มีมากขึ้น ก็จะเกิดบริเวณที่มีความไวน้อยลง (บริเวณอุณหภูมิ-เวลา ซึ่งการกัดกร่อนตามเกรนถูกเร่ง) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงเวลาที่จะเพิ่มขึ้น

### 2.1.3.2 แนวคมมีด (Knife line attack)

ในเหล็กกล้าไร้สนิมที่คงตัว เช่น ชนิด 321 และ ชนิด 347 คาร์บอนจะถูกทำให้คงที่เป็นคาร์ไบด์ (Tic, NbC) โดยการเติมไดคาร์บอนหรือไนโอเบียมลงไป และจะไม่มีรอยเชื่อมเชื่อมลงในบริเวณ HAZ ของโลหะชิ้นงาน

ถ้าการให้ความร้อนช่วงหลังถูกกระทำที่  $600^{\circ}$ - $650^{\circ}$  ซ. หลังการเชื่อม หรือถ้าโลหะรอยเชื่อมถูกใช้งานในช่วงอุณหภูมินี้ ปรากฏการณ์การกัดกร่อนตามเกรนซึ่งรู้จักกันในชื่อ “แนวคมมีด” ก็จะเกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียง ๆ กับเส้นหลอมละลายซึ่งเป็นอุณหภูมิการแข็งตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ในสภาวะการกัดกร่อน

แนวคมมีดนี้มีสาเหตุมาจากการลดลงของความต้านทานการกัดกร่อนตามเกรนของบริเวณการอบละลายตัว Tic หรือ NbC ก็จะถูกละลายอีกและถ้ามันถูกความร้อนอีกที่  $600^{\circ}$ - $650^{\circ}$  ซ. โครเมียมก็จะรวมตัวกับคาร์บอนเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรนออกสแตนในทิศทางที่ความต้านทานการกัดกร่อนตามเกรนก็จะต่ำลง

การเกิดแนวคมมีดนี้สามารถป้องกันได้โดยการให้ความร้อนอย่างคงที่หลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ  $870^{\circ}$ - $900^{\circ}$  ซ. ซึ่งจะทำให้เกิดการตกผลึกทั้งหมดของ Tic หรือ NbC อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ใช้ไม่ได้ผลกับเหล็กกล้าชนิด 321

### 2.1.3.3 การแตกร้าวจากความเค้นกัดกร่อน (Stress corrosion cracking)

การแตกร้าวจากความเค้นกัดกร่อน เป็นปัญหาใหญ่ที่สุดที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมออกสแตนในทิก และประมาณครึ่งหนึ่งของความเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม ก็คือการแตกร้าวจากความเค้นกัดกร่อน

การแตกร้าวจากความเค้นกัดกร่อนมีผลมาจากการมีปฏิกริยาร่วมกันระหว่างความเค้นทางดึงและสภาวะแวดล้อมการกัดกร่อน มันจะไม่เกิดขึ้นถ้าเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งไม่มีความเค้นทางแรงดึงรวมถึงความเค้นตกค้างที่มีสาเหตุมาจากการตกแต่งแปรรูปและการเชื่อม ความเค้นทางความร้อนและความเค้นที่ถูกกระตุ้นระหว่างการทำงาน ระหว่างความเค้นเหล่านี้ ความเค้นตกค้างจะเป็นสาเหตุที่ใหญ่ที่สุด สภาวะแวดล้อมการกัดกร่อนมักจะเกิดมาจากคลอไรด์ รูปที่ 2.12 แสดงความเค้นตกค้างในการเชื่อมต่อท่อ SUS304

เมื่อการแตกร้าวเกิดขึ้น ความเค้นก็จะกระจายซ้ำอีก และความเค้นทางแรงอัดที่มีแต่เดิมในบริเวณนั้นก็จะเปลี่ยนไปเป็นความเค้นทางแรงดึงเมื่อการแตกร้าวนั้นแพร่ไปถึง

ในโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมอสเตนไนติกที่มีเฟอร์ไรต์อยู่นั้นเฟอร์ไรต์ก็จะไปสกัดการแพร่ของการแตกร้าว ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และการแตกร้าวจากความเค้นกัดกร่อนจะเกิดขึ้นในโลหะรอยเชื่อมบ่อยครั้งกว่าในโลหะชิ้นงาน

วิธีการอย่างหนึ่งที่จะกำจัดความเค้นตกค้างของรอยเชื่อมก็คือการอบอ่อนลดความเค้น (Stress relief annealing) อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่สามารถมีผลต่อการกำจัดความเค้นตกค้าง ถ้าอุณหภูมิการอบให้ความร้อนประมาณ  $600^{\circ}\text{--}700^{\circ}\text{C}$ . ดังที่บ่งชี้ไว้ในตารางที่ 2.2 ในการกลับกันมันจะส่งผลให้ความต้านทานการกัดกร่อนตามเกรนลดลง เนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์หรือการแตกร้าวจากความเค้นกัดกร่อนตามเกรน เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงสิ่งบกพร่องเหล่านี้ การอบอ่อนลดความเค้นจึงควรกระทำที่อุณหภูมิประมาณ  $900^{\circ}\text{C}$ .

ปัจจุบันนี้ความพยายามที่จะทำการเพิ่มความต้านทานการแตกร้าวจากความเค้นกัดกร่อน ก็คือปรับปรุงวัสดุให้ดีขึ้น บางตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมาก ๆ 316 ELN, เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ซึ่งประกอบด้วยเฟสอสเตนไนท์ 50% และเฟสเฟอร์ไรท์ 50% และเหล็กกล้าเฟอร์ไรท์บริสุทธิ์สูงที่มีคาร์บอนต่ำและนิเกิลผสมอยู่ วัสดุเหล่านี้ถูกใช้ได้อย่างเหมาะสมในเงื่อนไขที่มีสภาวะแวดล้อมการกัดกร่อน

รูปที่ 2.14 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความต้านทานการแตกร้าวจากความเค้นกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเตนไนติกเดิม กับเหล็กกล้าไร้สนิมสองเฟสและเหล็กกล้าเฟอร์ไรท์บริสุทธิ์สูง (30 Cr-2Mo) ซึ่งแสดงให้เห็นความต้านทานแตกร้าวจากความเค้นกัดกร่อนที่ดีมากของเหล็กกล้าสองชนิดหลัง

#### 2.1.4 สมบัติทางกลของบริเวณรอยเชื่อม (Mechanical Properties of Welded Zone)

เหล็กกล้าไร้สนิมอสเตนไนติกถูกใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง บริเวณรอยเชื่อมจะแตกต่างจากบริเวณที่ไม่กระทบร้อนของโลหะชิ้นงาน ทั้งทางด้านโครงสร้างและการรับความร้อนและสมบัติทางกลของทั้งสองบริเวณก็แตกต่างกันด้วยในแต่ละช่วงอุณหภูมิที่แปรเปลี่ยนไป

ในบทต่อไปนี้จะกล่าวถึง สมบัติทางกลของโลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเตนไนติก โดยแบ่งการนำไปใช้งาน (การใช้งานที่อุณหภูมิปกติ, การใช้งานที่อุณหภูมิสูง และการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ) โดยจะอธิบายพื้นฐานเปรียบเทียบระหว่างโลหะชิ้นงานและบริเวณรอยเชื่อม

#### 2.1.4.1 เหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับการนำไปใช้งานที่อุณหภูมิปกติ

(Stainless steel normal-temperature application)

เหล็กกล้าไร้สนิมจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างออสเทนไนติกอิสระจากที่อุณหภูมิสูงมายังอุณหภูมิกปกติ เมื่อมันไม่ได้ถูกทำให้แข็งโดยการชุบ ก็จะได้ความแข็งแรงของ HAZ เท่าๆ กันกับของโลหะขึ้นงาน บริเวณรอยเชื่อมที่อุณหภูมิกปกติจะมีสมบัติทางกลที่ดีเยี่ยมและมีความอ่อนตัวและความเหนียวมากด้วย การเปรียบเทียบสมบัติทางกลระหว่างโลหะรอยเชื่อมและโลหะขึ้นงานถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 2.3 โลหะรอยเชื่อมจะมีความแข็งแรงจุดคราก (yield strength) สูงกว่าของโลหะขึ้นงาน แต่ความยืดหยุ่นและความเหนียวรอยเชื่อมจะน้อยกว่าแม้ว่าความแข็งแรงทางแรงดึงจะเท่าๆ กัน

การใช้การกระทำทางความร้อนเพื่อเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนทำให้เพิ่มความยืดหยุ่นและความเหนียวรอยเชื่อมสำหรับโลหะรอยเชื่อม แต่ความแข็งแรงจุดครากจะลดต่ำลง ดังนั้น การทำสมบัติทางกลของโลหะรอยเชื่อมจึงคล้ายๆ กันกับของโลหะขึ้นงาน

#### 2.1.4.2 เหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับการนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง

(Stainless steel for elevated temperature applications)

ความแข็งแรงจุดครากและความแข็งแรงทางดึงที่อุณหภูมิสูงของเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นปกติแล้วจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติกจะสูงมากกว่าของเหล็กคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เหล็กกล้าชนิด 316 และชนิด 347 มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงอยู่ในระดับที่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าชนิด 304 และเหล็กกล้าชนิดต่างๆ เหล่านี้ถูกใช้บ่อยๆ ในอุปกรณ์ที่ใช้ในอุณหภูมิสูงๆ

รูปที่ 2.16 แสดงการเปรียบเทียบของความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงระหว่างโลหะรอยเชื่อม (D308) และโลหะขึ้นงาน (ชนิด 304) ตามรูปที่แสดง, ความแข็งแรงทางดึงเกือบจะเท่ากันหมดที่อุณหภูมิต่างๆ และโลหะรอยเชื่อมจะมีความแข็งแรงจุดครากที่สูงกว่า ในขณะที่โลหะขึ้นงานจะแสดงความยืดหยุ่นที่สูงกว่า

ความแข็งแรงการคืบ (Creep strength) บางทีก็มีความจำเป็นสำหรับรอยเชื่อมต่อ การเชื่อมมีผลต่อความแข็งแรงการคืบน้อยมาก และทั้งรอยเชื่อมต่อและโลหะขึ้นงานจะมีความแข็งแรงการคืบที่คล้ายกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.17

ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เฟอไรต์ในเปอร์เซ็นต์คงที่จะมีอยู่ในโลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติก เพื่อป้องกันการแตกร้าร้อน และควรหมายเหตุไว้ด้วยว่า เฟอไรต์นี้ถ้าทิ้งไว้ในอุณหภูมิสูงที่ 600°-800° ซ. เป็นเวลานานอาจจะเกิดสารผสมของเหล็กและ

โครเมียมที่แทรกตัวไม่เป็นแม่เหล็ก ซึ่งเรียกว่า เฟสซิกม่า (Sigma phase) ดังนั้นโลหะรอยเชื่อมจะมีความอ่อนตัวและความเหนียวลดลง

รูปที่ 2.18 แสดงผลของการให้ความร้อนต่อความเหนียวรอบยากของโลหะรอยเชื่อมปริมาณเฟอร์ไรท์ที่มากขึ้น ความเหนียวรอบยากของโลหะรอยเชื่อมก็จะลดลงอย่างมาก แนวโน้มนี้จะมีขึ้นกับชนิด 316 มากกว่าชนิด 308 เป็นการชี้ให้เห็นว่าเมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้ที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ปริมาณเฟอร์ไรท์ในโลหะรอยเชื่อมควรจะรักษาให้ต่ำตลอดไป ลวดเชื่อมชนิด 16Cr-8Ni-2Mo (D16-8-2) ซึ่งมีความเปราะซิกม่าที่ต่ำ ก็จะถูกนำมาใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 และ 347

เฟสซิกม่าอาจจะเกิดขึ้นในโลหะรอยเชื่อมด้วยเมื่อมีการเชื่อม ซึ่งถึงแม้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 310 ที่ไม่มีเฟอร์ไรท์จะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน แต่เฟสซิกม่าก็อาจตกตะกอนโดยตรงจากเฟสออสเทนไนท์ และเฟสซิกม่านี้อาจจะทำให้โลหะชิ้นงานมีความเปราะ

การตกตะกอนของเฟสซิกม่าจะถูกอิทธิพลของธาตุเจือต่างๆ คือ คาร์บอน และนิเกิลเป็นตัวขัดขวางการตกตะกอน ในขณะที่ธาตุที่ทำให้เกิดเฟอร์ไรท์ เช่น โครเมียม, ซิลิกอน, โมลิบดีนัม และไนโอเบียม จะเป็นตัวเร่งการตกตะกอนของซิกม่า ถ้าโลหะรอยเชื่อมซิกม่าถูกกระทำทางความร้อนละลายตัวโดยโลหะรอยเชื่อมถูกชุบแข็งจากอุณหภูมิประมาณ 1050°ซ เฟสซิกม่าก็จะละลายเข้าไปในพื้น (matrix) และโลหะรอยเชื่อมก็จะมีความเหนียวรอบยากเหมือนเดิม

#### 2.1.4.3 เหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับการนำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

(Stainless steel for low-temperature application)

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนท์ไม่ได้แสดงบริเวณการเปลี่ยนความอ่อนและความเปราะที่ชัดเจนเหมือนเหล็กกล้าเฟอร์ไรท์ที่แสดงออกมา และด้วยเหตุนี้จึงให้ความเหนียวรอบยากที่สูง แม้ในที่มีอุณหภูมิต่ำมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.19 เนื่องจากข้อดีนี้เหล็กกล้านี้จึงถูกให้บ่อยเป็นวัสดุสำหรับเก็บหรือบรรจุก๊าซเหลว เช่น LNG, ออกซิเจน, ไนโตรเจน และอาร์กอน

ความแข็งแรงทางดึงของรอยเชื่อมต่อที่อุณหภูมิต่ำจะแปรเปลี่ยนไปเช่นเดียวกับโลหะชิ้นงาน และความแข็งแรงนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง แต่ความยืดหยุ่นจะลดลง

รูปที่ 2.20 แสดงการเปรียบเทียบความเหนียวที่อุณหภูมิต่ำ โลหะรอยเชื่อมจะมีความเหนียวรอบยากน้อยกว่าโลหะชิ้นงาน และที่บริเวณ HAZ ก็จะมีการลดลงของความเหนียวด้วยเช่นกัน

ความเหนียวของโลหะรอยเชื่อมได้รับอิทธิพลจากปริมาณเฟอร์ไรต์และปริมาณเฟอร์ไรต์ที่น้อยกว่าทำให้ความเหนียวเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงรูปที่ 2.21 ด้วยเหตุนี้ อิเล็กโทรดของการเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คที่มีปริมาณเฟอร์ไรต์จำกัดอยู่ก็จะถูกนำมาใช้ในการเชื่อมงานโครงสร้างโรงงาน LNG ก็ต้องการความเหนียวรอยบากในที่อุณหภูมิต่ำ

การเชื่อมทิกจะให้ออกซิเจนน้อยมากในโลหะรอยเชื่อม และความเหนียวรอยบากที่พอเหมาะสามารถกระทำได้แม้ว่าปริมาณเฟอร์ไรต์จะไม่ได้จำกัดไว้ก็ตาม และไม่มีข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับปริมาณเฟอร์ไรต์ในลวดเชื่อมของการเชื่อมทิก

## 2.2 การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมโครมิก

### (Welding of Chromic Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมโครมิกแบ่งออกเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ิก ซึ่งได้แก่ เหล็กกล้า 13% Cr (SUS 410) และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรต์ ซึ่งได้แก่ เหล็กกล้า 17% Cr (SUS 430) โดยแบ่งตามความแตกต่างกันของโครงสร้างจุลภาค โลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ิกและเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติก มีโครงสร้างจุลภาคและสมบัติต่างๆ ที่แตกต่างกัน

#### 2.2.1 โครงสร้างและสมบัติของรอยเชื่อมต่อ

##### (Structure and Properties of Weld Joints)

##### 2.2.1.1 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ิก (Martensitic Stainless Steel)

ด้วยความที่ไม่เหมือนกับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติก และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติก เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ิกจะมีจุดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่อุณหภูมิ 800-850 °ซ. และถ้ามันได้รับความร้อนเหนือช่วงอุณหภูมินี้แล้วให้เย็นตัวลงในทันที เฟสออสเทนไนท์ ก็จะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งมาก เมื่อทำการเชื่อมเหล็กกล้าชนิดนี้ โครงสร้างจุลภาคของ HAZ และโลหะขึ้นงานซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีเหมือนกันกับโลหะขึ้นงานก็จะถูกชุบแข็งเป็นมาร์เทนไซต์ โครงสร้างมาร์เทนไซต์นี้เป็นโครงสร้างที่แข็งและเปราะมาก มีความแข็งวิกเกอร์สูงกว่า 300 การแตกร้าวก็มักจะเกิดขึ้นในการเชื่อม

เพื่อที่จะป้องกันการแตกร้าว จึงจำเป็นที่จะต้องมีการให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม อีกทั้งจำเป็นต้องทำการอบคืนตัวโครงสร้างมาร์เทนไซต์โดยใช้การให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่เหมาะสม ดังนั้น สมบัติของโลหะรอยเชื่อม และ HAZ ก็จะเพิ่มขึ้น

รูปที่ 2.22 แสดงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลโดยการให้ความร้อนหลังการเชื่อมของโลหะรอยเชื่อมของโลหะรอยเชื่อม D 410 (13 Cr) ความแข็งจะลดลงทันทีที่อุณหภูมิเหนือ 600°ซ. และทั้งความยืดตัวกับความเหนียวรอยบากก็จะเพิ่มขึ้น

ความเหนียวรอยบากจะสูงสุดที่ประมาณ  $850^{\circ}\text{C}$ . แต่จะลดลงในทันทีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นที่  $900^{\circ}\text{C}$ . การเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกลโดยการให้ความร้อนหลังการเชื่อมนี้จะเกิดขึ้นคล้ายกับที่บริเวณ HAZ ของโลหะขึ้นงาน

ในแนวทางนี้ สมบัติต่างๆ ของรอยเชื่อมต่อสามารถทำให้ดีขึ้นโดยการอบคืนตัวมาร์เทนไซต์ การอบคืนตัวนี้จะได้ผลน้อยถ้าอุณหภูมิการให้ความร้อนหลังการเชื่อมต่ำ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงมากเกินไปก็สามารถสร้างปัญหาขึ้นมาได้ อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการให้ความร้อนหลังการเชื่อมของรอยเชื่อมต่อเหล็กกล้า 13 Cr คือประมาณ  $750^{\circ}\text{C}$ .

เหล็กหล่อเหนียวชนิด 13 Cr-Ni ที่เตรียมได้โดยการเติมนิเกิลหลายเปอร์เซ็นต์ลงในเหล็กกล้า 13 Cr ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเป็นวัสดุเหล็กหล่อเหนียวขนาดใหญ่สำหรับทำเครื่องมือต่างๆ เช่น ตัวขับเคลื่อนปั๊มในโรงกำเนิดพลังงาน การเติมนิเกิลในเหล็กกล้า 13 Cr จะเพิ่มทั้งความแข็งแรงและความเหนียว และยังป้องกันการแตกร้าวที่เนิ่นนานรวมทั้งเพิ่มความสามารถในการเชื่อมด้วย

#### 2.2.1.2 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติก (Ferritic stainless steel)

โครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติก แปรเปลี่ยนตามปริมาณคาร์บอนและโครเมียม ถ้าเหล็กกล้าชนิด 430 ถูกให้ความร้อนที่  $900^{\circ}\text{C}$ . หรือสูงกว่า และทำให้เย็นลงในทันที ก็จะทำให้เกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์หายบางส่วนอยู่ในมาร์เทนไซต์ ซึ่งทำให้เหล็กกล้านี้ค่อนข้างเปราะแม้ว่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

รูปถ่ายที่ 2.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมต่อของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS405 โดยใช้อิเล็กโตรด D410Nb เกรนเฟอร์ไรต์หายบางส่วนในบริเวณ HAZ ของโลหะขึ้นงานจะอยู่ใกล้ๆ กับขอบของโลหะรอยเชื่อม

เกรนเฟอร์ไรต์หายบางส่วนของโลหะขึ้นงานหรือในโลหะรอยเชื่อมไม่สามารถทำให้เล็กลงได้โดยการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ด้วยเหตุนี้ความเหนียวรอยบากของเหล็กกล้าชนิดนี้และโลหะรอยเชื่อมไม่สามารถทำกลับให้เหมือนเดิม แม้ว่าความอ่อนตัวจะกลับไปได้บ้าง ดูรูปที่ 2.23 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลของโลหะรอยเชื่อมเฟอร์ไรติก D430 (17Cr) และอุณหภูมิการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ทั้งความยืดตัวและการหดตัวจะเพิ่มขึ้น โดยการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่  $700^{\circ}$  ถึง  $800^{\circ}\text{C}$ . แต่ค่าการกระแทกจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

ปรากฏการณ์นี้สามารถใช้กับ HAZ ของโลหะขึ้นงาน อย่งไรก็ตามเหล็กกล้าโครเมียมต่ำ เช่น ชนิด 405 (13 Cr-Al) สามารถให้ความเหนียวรอยบากกลับคืนมาได้โดยการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิประมาณ  $700^{\circ}\text{C}$ . ดังรูปที่ 24

เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติก ได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิสูงจะแสดงปรากฏการณ์ที่เรียกว่าความเปราะ 475 °ซ. นอกจากนี้ความเปราะที่อุณหภูมิสูงขึ้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขยายเกรนและความเปราะซิกม่า จะปรากฏในการเชื่อมเหล็กกล้าออสเทนไนติก ซึ่งจุดนี้ควรที่จะนำมาพิจารณาเมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้

ความเปราะ 475 °ซ. เป็นลักษณะพิเศษของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติก เมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติกถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิสูง ก็จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าความเปราะ 475 °ซ. นอกเหนือจากความเปราะที่อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของเกรนและความเปราะซิกม่าที่ได้กล่าวถึงมาแล้วในการเชื่อมเหล็กกล้าออสเทนไนติก ในจุดนี้ควรที่จะนำมาพิจารณาเมื่อทำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้

ถ้าเหล็กกล้าที่มี Cr 15% หรือมากกว่า ได้รับความร้อนเป็นเวลานานที่อุณหภูมิ 370°-540 °ซ. หรือถ้าช่วงอุณหภูมินี้ถูกทำให้เย็นลงช้าๆ ก็จะเกิดความเปราะขึ้น ซึ่งความเปราะนี้ถูกเรียกว่า ความเปราะ 475 °ซ. เพราะว่าเกิดได้รวดเร็วที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 475 °ซ. ความเปราะ 475 °ซ. นี้จะเกิดขึ้นได้ง่ายมากเมื่อปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้น หรือเมื่อเวลาการให้ความร้อนนานขึ้น เมื่อทำการเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียมสูง ก็ไม่จำเป็นต้องเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อน และอุณหภูมิระหว่างเที่ยวเชื่อมให้สูงมาก

### 2.2.1.3 ลวดเชื่อมที่ผสมในโอเบียม

(Welding consumables containing niobium)

ความสามารถในการเชื่อมที่ต่ำของเหล็กกล้าไร้สนิมโครมิกก็เนื่องมาจากการเกิดมาร์เทนไซต์ที่แข็ง และโครงสร้างเฟอร์ไรท์หยาบตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ถ้าการเกิดมาร์เทนไซต์ถูกป้องกันไว้ได้อย่างได้ผลและถ้าโครงสร้างเหล็กกล้านี้สามารถให้เป็นเฉพาะเฟอร์ไรท์เกรนละเอียด แล้วก็จะทำให้ความสามารถในการเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมโครมิกดีขึ้น ด้วยความคิดนี้ ลวดเชื่อมโครมิกที่ผสมในโอเบียมก็ได้ถูกพัฒนาขึ้นในญี่ปุ่น ดังแสดงในรูปที่ 2 โลหะรอยเชื่อมที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรท์เกรนละเอียดเฟสเดียว

ในโลหะรอยเชื่อมที่มีในโอเบียม การตกตะกอนของมาร์เทนไซต์ก็就会被ขัดขวางเพราะว่าคาร์บอนไปรวมตัวกันในโอเบียม และเกรนของเฟอร์ไรท์ก็ทำให้เล็กลงได้ โดยการเติมอลูมิเนียมและไททาเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2.25 โลหะรอยเชื่อมชนิดนี้จะให้ความเหนียว รอยบากที่ดีหลังการเชื่อมและจะเพิ่มสูงขึ้นโดยการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

อย่างไรก็ตามเมื่อลวดเชื่อมที่ผสมในโอเบียม ถูกใช้ทำการเชื่อม มาร์เทนไซต์ และโครงสร้างเฟอร์ไรท์เกรนหยาบจะเกิดขึ้นในบริเวณ HAZ ของโลหะชิ้นงาน สมบัติของ



โลหะรอยเชื่อมเมื่อเชื่อมเสร็จแล้วก็ไม่สมบูรณ์ด้วย ด้วยเหตุนี้ขั้นตอนการทำงานในการให้ความร้อนก่อนเชื่อมและหลังการเชื่อมก็จะขาดไม่ได้

## 2.2.2 การป้องกันการแตกร้าวที่เนิ่นนานมา

### (Prevention of Delayed Cracking)

การแตกร้าวที่เนิ่นนานมาในเหล็กกล้าไร้สนิมโครมิก ดังในกรณีของการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำในเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง จะมีสาเหตุหลักมาจากไฮโดรเจนในบริเวณรอยเชื่อมในโลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมโครมิก ความเร็วในการแพร่กระจายไฮโดรเจนจะเป็น  $1/10$  ถึง  $1/25$  เท่าของเหล็กคาร์บอน ทำให้ระยะเวลาจนถึงการเกิดการแตกร้าวนานมาก ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องใส่ใจเป็นพิเศษต่อการแตกร้าวที่เนิ่นนานมา

การแตกร้าวที่เนิ่นนานมายังมีสาเหตุมาจากโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่แข็งและเปราะและเฟอร์ไรท์เกรนหยาบในบริเวณรอยเชื่อม นี่ก็ชี้ให้เห็นว่าการปรับปรุงโครงสร้างดังกล่าวโดยการให้ความร้อนหลังการเชื่อมเป็นการป้องกันการแตกร้าวที่สำคัญ

#### 2.2.2.1 ผลของการให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม

##### (Effects of pre-heating and post-heating)

การแตกร้าวที่เนิ่นนานมาสามารถป้องกันได้อย่างน่าพอใจ โดยการใช้การให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อมตามลำดับขั้นตอนอย่างเหมาะสม รูปที่ 2.26 แสดงผลที่น่าพึงของการให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อมที่มีต่อการแตกร้าวที่เนิ่นนานมาในการทดสอบร่องตะเข็บเชื่อมด้วยอิเล็กโตรด D430- Nb

สำหรับเหล็กกล้ามาร์เทนไซต์ก็จะใช้อุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนเชื่อมที่  $200^{\circ}\text{C}$  -  $400^{\circ}\text{C}$ . และอุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  -  $200^{\circ}\text{C}$ . สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติก อย่างไรก็ตาม เมื่อความหนาของแผ่นชิ้นงานหนาขึ้นและกักบังค้ำมากขึ้น ก็จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนเชื่อมสูงขึ้นด้วย

ในการเชื่อมเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง เฉพาะการให้ความร้อนก่อนเชื่อมเท่านั้นที่อาจจะกระทำเพื่อป้องกันการแตกร้าว ในทางกลับกันการแตกร้าวจะเกิดขึ้นได้ง่ายกับเหล็กกล้าไร้สนิมโครมิก ถ้ามันได้รับความร้อนก่อนเชื่อมที่  $200^{\circ}\text{C}$ . หรือมากกว่า และให้เย็นตัวลงในทันทีที่อุณหภูมิปกติ

เพื่อที่จะป้องกันการแตกร้าวที่เนิ่นนานมาของเหล็กกล้าไร้สนิมโครมิก ก็จะต้องให้ความร้อนหลังการเชื่อมต่อบริเวณรอยเชื่อมที่อุณหภูมิ  $250^{\circ}\text{C}$  -  $400^{\circ}\text{C}$ . ในทันทีหรือรักษาบริเวณรอยเชื่อมไว้ที่  $100^{\circ}\text{C}$ . หรือสูงกว่า จนกระทั่งเริ่มทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

#### 2.2.2.2 อิทธิพลของไฮโดรเจน (Influence of Hydrogen)

สาเหตุหลักของการ แตกร้าวที่เนิ่นนานมากก็คือไฮโดรเจน ดังนั้นวัสดุในการเชื่อมที่อาจเป็นการนำไปไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นในบริเวณรอยเชื่อมจึงต้องไม่ถูกนำมาใช้ รูปที่ 2.27 แสดงผลของการหาแนวโน้มในการแตกร้าวที่เนิ่นนานมาโดยการเชื่อมพอกบนแผ่นชิ้นงานหนาโดยใช้อิเล็กโทรดที่มีปริมาณไฮโดรเจนแตกต่างกัน (อิเล็กโทรดสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมโครมิตที่ผสมในโอเบียม) จะเห็นว่าเมื่อปริมาณไฮโดรเจนมีมากขึ้น การแตกร้าวนี้ก็จะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า

จากเหตุผลนี้ ปริมาณไฮโดรเจนของอิเล็กโทรดในเหล็กกล้าไร้สนิมโครมิตจึงถูกรักษาให้ต่ำไว้ อย่างไรก็ตาม การดูดซับความชื้นในเปลือกปลั๊กก็เป็นผลให้การเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนทำให้บริเวณรอยเชื่อมเกิดการแตกร้าว เพื่อป้องกันสิ่งนี้อิเล็กโทรดจะต้องได้รับการอบแห้งก่อนที่จะทำการเชื่อม เงื่อนไขที่ต้องการให้การอบแห้งสำหรับอิเล็กโทรดในการเชื่อมอาร์คคือ  $300^{\circ}\text{C} - 350^{\circ}\text{C}$ . เป็นเวลา 30-60 นาที

## 2.3 การเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน

### (Welding of Dissimilar Metal)

เหล็กกล้าไร้สนิมมีสมบัติที่พิเศษในด้านการต้านทานการกัดกร่อนและการต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน และยังมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมจึงถูกนำมาใช้ในโครงสร้างของงานที่ใช้ในอุณหภูมิสูง, แรงดันสูง, และในชิ้นส่วนที่สำคัญต่างๆ ในอุปกรณ์ทางด้านเคมี อย่างไรก็ตาม ถ้าใช้เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีราคาแพงในส่วนที่ไม่มีความสำคัญก็จะเป็นการประหยัด จากเหตุผลทางด้านความประหยัดหรือจากความจำเป็นในการออกแบบ เช่น อุณหภูมิและแรงดันจึงได้มีการใช้งานเชื่อมโครงสร้างจริงๆ อย่างกว้างขวางคือ การเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าคาร์บอน, การเชื่อมเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม, และการเชื่อมพอกเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน

ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันเหล่านี้ ควรจะใส่ใจในการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีของโลหะรอยเชื่อมโดยการเจือจาง (dilution), การเคลื่อนย้ายคาร์บอนในบริเวณขอบการหลอมละลาย, และความล้าจากความร้อนในรอยเชื่อมต่อ

#### 2.3.1 การเปลี่ยนแปลงส่วนผสมโลหะในการเชื่อมโดยการเจือจาง

##### (Change in Weld Metal Composition by Dilution)

ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าคาร์บอน วัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองควรถูกเลือกที่มีปริมาณนิเกิล และ โครเมียมสูงกว่าของโลหะชิ้นงาน

กล้าไร้สนิม อีกทั้งยังจำเป็นที่จะควบคุมการซึมลึกเข้าไปในโลหะชิ้นงานให้เหมาะสมด้วย มิฉะนั้น การแตกร้าวในการเชื่อมหรือความเปราะของโลหะรอยเชื่อมจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อมและ ปัญหาอื่นๆ ก็อาจเกิดขึ้นได้ ส่วนผสมทางเคมีของโลหะรอยเชื่อมที่เจือจางโดยโลหะต่างชนิดกัน สามารถประมาณการณได้โดยการใช้แผนภาพของเชฟฟีเลอร์ (Schaeffler's diagram) ดังรูปที่ 2.28

สำหรับตัวอย่าง, มาพิจารณาคู่ส่วนผสมทางเคมีของโลหะรอยเชื่อมถูกเปลี่ยนแปลง โดยการซึมลึกไปยังโลหะชิ้นงาน โดยพิจารณากรณีของการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันของเหล็ก คาร์บอน (SS41) และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติก (ชนิด 304) โดยใช้อิเล็กโทรด D309 ดังแสดง ในรูปที่ 29

ถ้าเราสมมติว่า SS41 และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 จะซึมลึกในอัตราเดียวกันเมื่อ ทำการเชื่อม ดังนั้น เราสามารถแก้ไขการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันนี้ให้ง่ายขึ้นเป็นการเชื่อมโลหะชิ้นงานมีส่วนผสมทางเคมีที่บ่งชี้โดยจุด (a) ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางระหว่างเส้นที่ลากต่อโลหะชิ้นงานทั้งสองในแผนภาพหรือไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 2.28 ฉะนั้นส่วนผสมทางเคมีของโลหะรอยเชื่อมที่เกิดจากอิเล็กโทรดชนิด 309 สามารถพบได้บนเส้นต่อระหว่าง จุด (a) และจุดของ D309 และตำแหน่งของมันก็จะแปรเปลี่ยนไปตามอัตราการซึมลึกต้องถูกกำหนดตามค่าที่ลดลงนั้น

อย่างไรก็ตาม ถ้าอัตราการซึมลึกมีค่าน้อยมาก สมบัติทางเคมีของโลหะรอยเชื่อมก็จะเข้าใกล้ D309 และโลหะรอยเชื่อมอาจจะเปราะ เนื่องจากการตกตะกอนของเฟสซิกม่า เมื่อทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

### 2.3.2 ปัญหาในการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดกัน

#### (Problems in Dissimilar Welded Joint)

##### 2.3.2.1 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณขอบ

##### (Microstructure of boundary zone)

ถ้าเหล็กกล้าคาร์บอนหรือเหล็กกล้าเจือต่ำ ถูกเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมหรือลวดเชื่อมเจือนิเกิลสูง บริเวณการถ่ายเทซึ่งอยู่ใกล้ๆ กับเส้นหลอมละลายก็จะเกิดขึ้นในโลหะรอยเชื่อม และธาตุเจือเช่นโครเมียมและนิเกิลก็จะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในบริเวณนี้ ในรูปที่ 2.30 แสดงผลของการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงในโลหะรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมเหล็กคาร์บอน (SM41) ด้วยอิเล็กโทรด D309 ตามรูปที่แสดงนั้น โครเมียม (Cr), นิเกิล (Ni), แมงกานีส (Mn) และเหล็ก (Fe) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้ความเข้มข้นจะลดลงทีละน้อยในช่วงประมาณ 150  $\mu\text{m}$  ในด้านโลหะรอยเชื่อม

ส่วนผสมทางเคมีในช่วงประมาณ 150  $\mu\text{m}$  สามารถประมาณการณได้ จากแผนภาพของเซฟไฟเลอร์เมื่อโครงสร้างมาร์เทนไซต์เกิดขึ้น และเราสามารถหาชั้นของแถบมาร์เทนไซต์ในโครงสร้างจุลภาคนั้นได้ ชั้นมาร์เทนไซต์ชนิดนี้มักจะถูกรับเรียกว่ามาร์เทนไซต์เกี่ยวพัน (bond martensite) ชั้นมาร์เทนไซต์นี้มีความแข็งแรงและความเหนียวรอบอบก็ต่ำเมื่อผ่านการเชื่อมมาแล้ว ถ้าโลหะรอยเชื่อมนี้ไม่ได้รับการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ก็อาจจะเกิดการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำในบริเวณนี้

เมื่อใช้อิเล็กโตรดชนิดเกิดสูง เช่น อินโคเนล (Inconel) บริเวณการถ่ายเทของนิเกิลและโครเมียมสามารถถูกสังเกตได้ที่ใกล้ๆ กับเส้นรอยต่อ อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณนิเกิลมีสูงก็จะไม่เกิดมาร์เทนไซต์เกี่ยวพันขึ้นที่บริเวณนี้

รูปที่ 2.31 แสดงผลของการวัดความเหนียวรอบอบใกล้กับบริเวณขอบระหว่างโลหะขึ้นงานและโลหะรอยเชื่อม โดยการเชื่อมเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงด้วยอิเล็กโตรดเหล็กกล้าไร้สนิมอสเตนไนติกชนิดต่างๆ ในแต่ละกรณีแสดงการลดลงของความเหนียวรอบอบเมื่อรอยบากนั้นอยู่ในเส้นรอยต่อ การลดลงนี้จะน้อยลงเมื่อปริมาณของนิเกิลในอิเล็กโตรดสูงขึ้น การลดลงในค่าการกระแทกจะรักษาไว้ที่ 2 กก. แรง/ม<sup>2</sup>

สมบัติความแข็งแรงหรือความเปราะที่น้อยลงในบริเวณขอบ อธิบายได้ว่าทำไมอิเล็กโตรดชนิดอินโคเนลจึงถูกแนะนำให้ใช้กับการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดกันที่ซึ่งการให้ความร้อนหลังการเชื่อมอย่างเหมาะสมไม่สามารถนำมาใช้ได้

ปัญหาอย่างอื่นในการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าคาร์บอนก็จะมี การเคลื่อนย้ายคาร์บอนด้วย เมื่อเหล็กกล้าทั้งสองชนิดที่มีปริมาณโครเมียมแตกต่างกันถูกเชื่อมต่อกัน และถ้ารอยต่อนั้นถูกให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิสูง ก็จะทำให้คาร์บอนเคลื่อนย้ายจากด้านที่มีโครเมียมต่ำไปยังด้านที่มีโครเมียมสูง เป็นผลให้ชั้นการลดคาร์บอนก่อตัวขึ้นในด้านโครเมียมต่ำ (เหล็กกล้า 2.25% Cr-1% Mo) ในขณะที่ชั้นการเพิ่มคาร์บอนก่อตัวขึ้นที่ด้านโครเมียมสูง (เหล็กกล้าไร้สนิม) ดังแสดงในรูปถ่ายที่ 2.3 รูปที่ 2.32 จะแสดงตัวอย่างของการกระจายความแข็งแรงในบริเวณการถ่ายเทคาร์บอนก่อนและหลังการกระทำ ความร้อน ความแข็งแรงที่ลดลงจะแสดงในชั้นการลดคาร์บอนในขณะที่ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นถูกแสดงในชั้นการเพิ่มคาร์บอน

ในชั้นการเพิ่มคาร์บอน จะมีคาร์ไบด์เป็นจำนวนมาก (มักจะเป็นโครเมียมคาร์ไบด์) ที่ตกตะกอนเนื่องจากการเคลื่อนย้ายคาร์บอน และบางทีความแข็งแรงก็เพิ่มขึ้นถึง 400 ในสเกลวิกเกอร์ ชั้นการเพิ่มคาร์บอนนี้มีผลอย่างไรต่อรอยเชื่อมต่อก็ยังไม่แจ่มชัดนัก อย่างไรก็ตามรอยแตกเล็กๆ อาจจะเกิดขึ้นในชั้นการเพิ่มคาร์บอนนี้เนื่องจากความแข็งแรงที่แตกต่างกันมากเมื่อให้ความเย็นดัดโค้ง ในความรู้สึกนี้การมีชั้นคาร์บอนมากๆ ที่มากเกินไปจึงไม่เป็นที่ต้องการ ชั้นการลดคาร์บอนจะให้

เฉพาะการจำกัดอิทธิพลต่อความแข็งแรงทางดึง แม้ว่าการลดลงของความแข็งแรงการคืบแตกจะถูกบันทึกไว้

โดยทั่วไป การเคลื่อนย้ายคาร์บอนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการให้ความร้อนมากกว่าช่วงเวลาในการให้ความร้อน ในการทำงานจริง การลดอุณหภูมิการให้ความร้อนมีผลทำให้ความแข็งแรงสูงสุดของชิ้นการเพิ่มคาร์บอนลดลง

### 2.3.2.2 การล้าเนื่องจากความร้อน (Thermal fatigue)

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติกมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงที่สูงประมาณ 1.5 เท่าของเหล็กคาร์บอนและเหล็กกล้าเจือต่ำ ถ้าให้บริเวณรอยเชื่อมเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในทันทีทันใด (Thermal shock) หรือถ้าเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิช้าไปช้ามา (Thermal fatigue) ความเค้นจากความร้อนจะมีสาเหตุมาจากความแตกต่างในการขยายตัวทางความร้อนก็จะเกิดการแตกร้าวหรือสิ่งบกพร่องอื่นๆ ในบริเวณขอบ ซึ่งอาจนำไปสู่ความเสียหายในที่สุด

รูปที่ 2.33 แสดงผลของการทดสอบการล้าเนื่องจากความร้อนที่มีขึ้นบนรอยเชื่อมต่อโลหะที่ไม่เหมือนกัน ในการทดสอบนี้ เหล็กกล้า 2.25% Cr-1 % Mo และเหล็กกล้าชนิด 304 L ถูกเชื่อมเข้าด้วยกันโดยใช้อิเล็กโทรดชนิด D309 และที่ปลายของรอยต่อทั้งสองถูกตรึงไว้ รอยเชื่อมต่อนี้ก็จะได้รับความร้อนเปลี่ยนแปลงช้าไปช้ามาระหว่างอุณหภูมิห้องกับอุณหภูมิสูงๆ ที่แปรเปลี่ยนไป และเกิดความเค้นทางความร้อนขึ้น เส้นกราฟจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิให้ความร้อนสูงสุดกับจำนวนรอบที่จะเกิดความล้า อุณหภูมิให้ความร้อนสูงสุดที่สูงขึ้น (เช่น ความเค้นทางความร้อนสูงขึ้น) ความล้าก็จะเกิดขึ้นได้เร็วมากขึ้น ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าการคงอยู่ของชิ้นการลดคาร์บอน โดยการให้ความร้อนหลังการเชื่อมจะลดอายุการล้าของการล้าทางความร้อน

เมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติก และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติกถูกทำการเชื่อมต่อกัน ปฏิกริยาตรงข้ามกันไม่สามารถกำจัดออกไปได้หมด เพราะว่าผลของมันมาจากปัญหาที่แท้จริงของการขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเป็นไปได้ที่จะลดปฏิกริยาตรงข้ามกันนี้ แม้ว่าจะไม่สามารถกำจัดไปได้หมด โดยถ้าโลหะต่างชนิดกันทั้งคู่เชื่อมต่อกันเข้าด้วยกันโดยใช้ลวดเชื่อมที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนปานกลาง จากเหตุผลนี้จึงแนะนำให้ใช้ลวดเชื่อมชนิดอินโคเนล (ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนประมาณ 1.1 เท่าของเหล็กกล้าคาร์บอน) สำหรับการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูง

### 2.3.2.3 การแตกร้าวใต้ชั้นเคลือบ (UCC) และการไม่ประสานกันเพราะไฮโดรเจน (Under Clad Cracking (UCC) and Disbonding by Hydrogen)

ปัญหาใหญ่ที่อาจเกิดใกล้กับแนวรอยต่อของบริเวณรอยเชื่อมพอกโดยใช้ อิเล็กโทรดแบบแผ่นแถบก็คือ การแตกร้าวได้ชั้นเคลือบและการไม่ประสานกันเพราะไฮโดรเจน

### 1. การแตกร้าวได้ชั้นเคลือบ (UCC)

การแตกร้าวได้ชั้นเคลือบเป็นสิ่งบกพร่องขนาดเล็กมากเกิดขึ้นในบริเวณ HAZ ของ โลหะขึ้นงานเหล็กกล้าเชื่อมระหว่างทำการเชื่อมพอกเหล็กกล้าไร้สนิม สิ่งบกพร่องนี้เกิดขึ้นที่มุม ตั้งฉากกับทิศทางการเชื่อมและเกิดขึ้นในบริเวณที่พื้นที่เกรนหยาบของ HAZ ในโลหะขึ้นงาน (ได้รับความร้อนมากกว่า 1200°ซ. ในการเชื่อมตะเจ็บบแรก) ถูกความร้อนซ้ำอีกที่ 600-700°ซ. โดย ตะเจ็บบเชื่อมที่สอง การเกิดขึ้นของ UCC ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโลหะขึ้นงานและความร้อนเข้าของการเชื่อม

เพื่อป้องกัน UCC วิธีการต่อไปนี้ก็จะถูกนำมาปฏิบัติคือ 1. ใช้เหล็กกล้าที่มีความไว น้อยต่อการเกิด UCC 2. ให้ความร้อนซ้ำกับพื้นที่เกรนหยาบหลักการเชื่อม หรือทำการเชื่อมเคลือบ สองชั้นเพื่อลดขนาดเกรน 3. จำกัดความร้อนเข้าของการเชื่อม

### 2. การไม่ประสานกันเพราะไฮโดรเจน

การไม่ประสานกันเพราะไฮโดรเจนเกิดขึ้นในโลหะรอยเชื่อมใกล้กับแนวการ ประสานตัวอย่างเช่น เมื่อภาชนะบรรจุรับแรงดันเช่น เตาปฏิกรณ์โรงกลั่นปิโตรเลียมทำงานที่ อุณหภูมิสูง และบรรยากาศไฮโดรเจนแรงดันสูงทำการเปิดซ่อม นี่ก็คือชนิดหนึ่งของการแตกร้าวที่ เน้นนานมา มีสาเหตุมาจากไฮโดรเจน เมื่อภาชนะรับแรงดันถูกปิดซ่อมไฮโดรเจนซึ่งแทรกตัวอยู่ใน โลหะชั้นเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมระหว่างการทำงานก็จะสะสมใกล้ๆ กับแนวการต่อก็จะแพร่แทรก เข้าไปในโลหะขึ้นงาน การสะสมของไฮโดรเจนนี้เชื่อกันว่าเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายขึ้น

การแตกร้าวนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทำงาน (แรงดันไฮโดรเจนและอุณหภูมิ) ของ ภาชนะรับแรงดัน และอัตราการเป็นตัวเมื่อการทำงานหยุดลง นอกจากนี้ยังได้รับอิทธิพลจาก ส่วนผสมทางเคมีของโลหะขึ้นงานและโลหะรอยเชื่อมและการขยายตัวของเกรน รูปที่ 2.34 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายตัวของเกรนหยาบในโลหะรอยเชื่อมใกล้กับแนวการประสาน และความไวในการไม่ประสานกัน ในกรรมวิธีการเชื่อมต่าง ๆ กรรมวิธีการเชื่อมแบบปกคลุมการ อาร์ค (SMAW) และกรรมวิธีการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุม (SAW) จะให้เกิดเกรนหยาบน้อยกว่า และให้ความไวต่ำในการประสานกัน อย่างไรก็ตาม ถ้าความร้อนเข้าเพิ่มขึ้นในกรณีของการเชื่อม อิเล็กโทรสแตติก (ESW) ที่กว้าง 75 มม. และ ESW กว้าง 150 มม. ก็จะทำให้เกิดเกรนหยาบขึ้นมากดังนั้น ความไวในการแตกร้าวก็เพิ่มขึ้นด้วย

### 2.3.3 ลำดับขั้นตอนในการเชื่อมและการเลือกวัสดุงานเชื่อมล้นปลีอง

#### (Welding Procedure and Selection of Welding Consumables)

##### 2.3.3.1 การเชื่อมตอรอยต่อ (Welding of Joints)

การเชื่อมโลหะต่างชนิดกันหมายถึงการเชื่อมโลหะชิ้นงานที่ต่างชนิดกันวัสดุงานเชื่อมล้นปลีองสำหรับการเชื่อมนี้ควรจะถูกเลือกโดยการพิจารณาถึงสมบัติต่าง ๆ ของแต่ละโลหะชิ้นงาน การเปลี่ยนแปลงสมบัติของโลหะรอยเชื่อมเนื่องจากการซึมลึกโลหะชิ้นงานอิทธิพลของการให้ความร้อนหลังการเชื่อมและสภาวะแวดล้อมของโครงสร้างงานเชื่อมที่ถูกติดตั้งหรือทำงานตารางที่ 2.4 แสดงตัวอย่างการนำไปใช้งานของอิเล็กโทรดทูปหลักรูปที่ให้กับโลหะต่างชนิดกันแบบต่าง ๆ

ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันระหว่างเหล็กคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติกชนิด 304 , ชนิด 309 อิเล็กโทรดที่มีปริมาณนิกเกิลและโครเมียมมากกว่าโลหะชิ้นงานก็จะถูกนำมาใช้ เหตุผลก็คือ ถ้าอิเล็กโทรดโลหะที่คล้ายกันเช่นชนิด 308 และ ชนิด 316 ถูกนำมาใช้ก็จะทำให้ปริมาณนิกเกิลและโครเมียมของโลหะรอยเชื่อมลดต่ำลงเนื่องจากการเจือจางไปกับเหล็กคาร์บอนและอาจนำไปสู่การเกิดการแตกร้าวร้อนหรือการแตกร้าวเย็น การใช้อิเล็กโทรดชนิด 310 ที่ผสมธาตุเจือสูงถูกแนะนำให้ใช้ในหนังสือคู่มือบางเล่ม แต่สิ่งนี้จะทำให้โลหะรอยเชื่อมเปลี่ยนไปเป็นออสเทนไนต์อย่างสมบูรณ์ และมีความไวอย่างมากต่อการเกิดการแตกร้าวร้อนและดังนั้นการใช้งานบางอย่างจึงไม่เหมาะสม

เมื่อเหล็กหล่อไร้สนิมหรือเหล็ก S45C (เหล็กหล่อเหนียว) ที่มีคาร์บอนผสมอยู่มากถูกใช้เป็นโลหะชิ้นงาน การแตกร้าวร้อนก็อาจเกิดขึ้นแม้ว่าจะใช้อิเล็กโทรดชนิด 309 ในกรณีนี้จะเป็นการดีถ้าใช้อิเล็กโทรดชนิด 312 ซึ่งมีเฟอร์ไรต์มากกว่าและสามารถทำให้โลหะรอยเชื่อมมีความไวต่อการแตกร้าวร้อนน้อยลง

เมื่อใช้กรรมวิธีการเชื่อมแบบหลายชั้นเชื่อมกับชิ้นงานหนา ๆ โดยใช้อิเล็กโทรดชนิด 309 ในแต่ละเที่ยวเชื่อม ชั้นเชื่อมเหล่านี้จะมีการซึมลึกน้อยในโลหะชิ้นงานจะมีส่วนผสมโครเมียมสูงและเฟอร์ไรต์สูง โลหะรอยเชื่อมชนิดนี้ซึ่งถึงแม้จะไม่มีปัญหาเกิดขึ้นเมื่อใช้ที่อุณหภูมิปกติในกรณีเชื่อมเสร็จแล้ว แต่ก็อาจจะใช้การตกตะกอนของเฟสซีม่าที่มีความเปราะจึงต้องทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อมหรือเมื่อใช้งานในที่อุณหภูมิสูง ๆ ในแต่ละกรณีก็จะถูกแนะนำให้ใช้การเชื่อมคลุมผิว (butter) ของด้านเหล็กคาร์บอนด้วยอิเล็กโทรดเฟอร์ไรต์สูงเช่นชนิด 309 แล้วจึงทำการเชื่อมรอยต่อด้วยวิธีการใช้โลหะที่คล้ายคลึงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.35

ในตารางที่ 2.4 อิเล็กโตรดชนิดอินโคเนลถูกใช้เพื่อจุดประสงค์ในการป้องกันความเปราะที่เกิดขึ้นโดยการเคลื่อนย้ายคาร์บอนและการล้าเนื่องจากความร้อนที่อาจเกิดขึ้นเมื่อรอยเชื่อมต้องถูกใช้งานในสภาวะแวดล้อมอุณหภูมิสูง ๆ

### 2.3.3.2 การเชื่อมเหล็กกล้าเคลือบ (Welding of Clad Steel)

ในการเชื่อมเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม ความแข็งแรงของโครงสร้างจะอยู่ที่บริเวณโลหะชั้นงานในขณะที่วัสดุเคลือบต้องให้ความต้านทานการกัดกร่อน จากเหตุผลนี้จึงควรทำการเลือกลวดเชื่อมและเงื่อนไขการเชื่อมอย่างระมัดระวัง ตารางที่ 2.5 แสดงตัวอย่างการนำไปใช้งานของลวดเชื่อมที่ถูกใช้เมื่อทำการเชื่อมเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม

การเชื่อมชั้นเชื่อมที่ฐาน (root pass) คล้าย ๆ กับการเชื่อมชั้นเชื่อมแรกของการเชื่อมพอกผิวที่จะกล่าวถึงตอนหลังโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันด้วยเหล็กคาร์บอนหรือเหล็กกล้าเชื้อต่ำบนด้านโลหะชั้นงาน ดังนั้นอิเล็กโตรดชนิด 309 ที่มีปริมาณนิกเกิลและโครเมียมมากกว่าโลหะเคลือบต้องถูกใช้สำหรับการเชื่อมชั้นเชื่อมที่ฐาน สำหรับชั้นเชื่อมที่สองหรือถัดมานั้นควรจะใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมทางเคมีคล้ายกับโลหะเคลือบ

เมื่อลวดเชื่อมชนิด 309 ถูกใช้สำหรับการเชื่อมชั้นเชื่อมที่ฐานของเหล็กกล้า SUS316 ปริมาณโมลิบดีนัมที่ต้องการอาจจะไม่ได้รับในชั้นเชื่อมที่สอง ในกรณีนี้ลวดเชื่อมชนิด 309 Mo ที่มีโมลิบดีนัมผสมอยู่ควรจะนำมาใช้สำหรับการเชื่อมที่ฐาน

เมื่อโลหะเคลือบคือเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติก SUS 405 ชั้นเชื่อมที่ฐานควรเชื่อมด้วยลวดเชื่อม 430 Nb และชั้นเชื่อมที่สองและถัดมาควรเชื่อมด้วยลวดเชื่อม 410 Nb สำหรับโครงสร้างที่ต้องใช้งานในอุณหภูมิต่ำกว่า 400°C. ลวดเชื่อมชนิด 309 ก็จะถูกใช้บ่อย ๆ เพราะว่ามีอิทธิพลน้อยต่อการเกิดการล้าจากความร้อน ตารางที่ 2.6 แสดงตัวอย่างของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบโดยใช้เส้นลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (flux-cored wires)

ในกรณี A ของตารางที่ 2.6 แสดงการเชื่อมที่กระทำบนด้านโลหะเคลือบหลังจากการเชื่อมด้านโลหะเคลือบแล้วการเซาะร่องด้านหลังก็จะถูกกระทำก่อนที่จะทำการเชื่อมด้านหลังต่อไปในกรณีนี้การเซาะร่องด้านหลังไม่ควรทำลึกเกินไปมิฉะนั้นโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมอาจจะเปิดออก และโลหะรอยเชื่อมของชั้นเชื่อมที่ฐานด้านหลัง (ชั้นเชื่อมที่ 4 ในรูปนี้) อาจจะถูกผสมกับส่วนประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิม เช่นโครเมียมและนิกเกิล ดังนั้นจะเกิดความแข็งแรงขึ้นและเป็นผลให้เกิดการแตกร้าว

ในกรณี B ของตารางที่ 2.6 ทำการเชื่อมด้านโลหะชั้นงานเป็นอันดับแรก แล้วจึงเชื่อมด้านโลหะเคลือบทีหลัง ในกรณีนี้ผิวหน้าของฐานควรจะถูกเตรียมดังนั้นการซึมลึกของการเชื่อมชั้นเชื่อมที่ฐานจะไม่ถึงโลหะเคลือบ



### 2.3.3.3 การเชื่อมพอก (Overlay welding)

ในการเชื่อมพอกของเหล็กกล้าไร้สนิม การเชื่อมชั้นเชื่อมแรกจะเหมือนกับการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันและคล้ายกับการเชื่อมโลหะเคลือบ ในขณะที่ชั้นเชื่อมที่สองและชั้นเชื่อมต่อมาจะถูกเชื่อมด้วยโลหะที่ใช้ในการเชื่อม ฉะนั้นการเชื่อมชั้นเชื่อมแรกจำเป็นต้องเลือกใช้วัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองโดยพิจารณาถึงการเงาของโลหะชิ้นงาน ซึ่งแตกต่างจากวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองที่ใช้สำหรับชั้นเชื่อมที่สองและชั้นถัดมา

โดยหลักการเบื้องต้นตามที่อธิบายไว้ข้างต้น ชั้นเชื่อมชั้นแรกจะใช้ลวดเชื่อมตามตารางที่ 2.5 ส่วนตารางที่ 2.7 แสดงกรรมวิธีการเชื่อมต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการเชื่อมพอกเหล็กกล้าไร้สนิมและคุณลักษณะต่าง ๆ

ระหว่างกรรมวิธีเหล่านี้ กรรมวิธีเชื่อมพอกใช้อิเล็กโทรดแผ่น (Strip electrode) เป็น การเชื่อมที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด แต่การนำไปใช้งานของมันก็จำกัดเฉพาะเพื่อทำการเชื่อมพอก งานที่มีรูปร่างธรรมดาด้วยพื้นที่กว้าง ๆ อีกทั้งอัตราการซึมลึกในโลหะชิ้นงาน (อัตราการเงา) จะแปรเปลี่ยนตามกรรมวิธีการเชื่อมต่าง ๆ ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองจึงจำเป็นต้องพิจารณากรรมวิธีการเชื่อมที่จะใช้เป็นอันดับแรก

อัตราการซึมลึกของโลหะชิ้นงานแปรเปลี่ยนตามกระแสไฟเชื่อม , แรงดันการเชื่อม , ความเร็วการเชื่อม , ปริมาณของการแตะแต่ละชั้นเชื่อม อุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนเชื่อม และอุณหภูมิระหว่างเปลี่ยนที่เชื่อม , ส่วนอื่นของเส้นลวดเชื่อมและอื่น ๆ ดังนั้นเงื่อนไขในการเชื่อมเหล่านี้ควรที่จะต้องควบคุมอย่างเต็มที่

รูปที่ 2.36 และ 2.37 แสดงอัตราการซึมลึกของบริเวณชั้นเชื่อมที่ฐานโดยการเชื่อมอาร์คก๊าซคลุม จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการเชื่อมต่าง ๆ อย่างไร จากรูปแสดงว่า อัตราการซึมลึกเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟเชื่อมเพิ่มขึ้น หรือความเร็วการเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้รอยเกยตะเข็บเชื่อมที่จะ

ในการเชื่อมพอกเหล็กกล้าไร้สนิม การให้ความร้อนหลังการเชื่อมถูกกระทำเพื่อลดความแข็งแรงได้ต่ำเท่ากับการลดคามเค้นของบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ของโลหะชิ้นงาน ผลของการให้ความร้อนหลังการเชื่อมนี้คือการเกิดชั้นการลดคาร์บอน และการเพิ่มคาร์บอนใกล้กับขอบของโลหะชิ้นงาน และโลหะรอยเชื่อม ผลของการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์และเฟสซิกมาในโลหะรอยเชื่อมทำให้โลหะรอยเชื่อมเปราะและลดความต้านทานการกัดกร่อน

เมื่อพิจารณาสมบัติของบริเวณที่ถูกเชื่อมพอก อุณหภูมิการให้ความร้อนหลังการเชื่อมควรจะรักษาให้ต่ำเท่าที่จะทำได้ ค่าจำกัดขั้นต่ำของอุณหภูมิการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่แนะนำสำหรับโลหะชิ้นงานควรที่จะนำมาใช้ปฏิบัติ ถ้าการเชื่อมภาชนะรับแรงดันของแผ่นนามี

ความจำเป็นต้องการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิสูงและเวลานานขึ้น ก็จำเป็นต้องพิจารณาอย่างระมัดระวังถึงส่วนผสมทางเคมี หรือเลือกใช้วัสดุงานเชื่อมที่เปลี่ยนไปเพื่อไรท์น้อย

## 2.4 การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่พัฒนาใหม่สุด

### (Welding of Newly Developed Stainless Steels)

เมื่อเร็ว ๆ นี้ เหล็กกล้าไร้สนิมคุณภาพสูง , เหล็กกล้าไร้สนิมไฮโดรเจนสูง และเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อไรท์ที่บริสุทธิ์สูง ได้ถูกนำไปใช้งานหลายอย่างโดยหลักใหญ่ก็คือปรับปรุงให้มีความต้านทานการกัดกร่อนและความแข็งแรงทางกลเพิ่มขึ้น ในบทนี้จะแนะนำถึงคุณลักษณะและความสามารถในการเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดใหม่เหล่านี้ รวมถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของบริเวณรอยเชื่อมอีกทั้งการตกตะกอนแข็งตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมนี้ก็จะถูกกล่าวถึงด้วย

#### 2.4.1 เหล็กกล้าไร้สนิมคุณภาพสูง (Duplex Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนท์ถูกใช้เป็นเหล็กโครงสร้างอย่างกว้างขวางเพราะว่าเหล็กชนิดนี้มีความสามารถในการอ่อนตัว ความเหนียว และความสามารถในการตกแต่งที่ดีมาก ข้อเสียของมันก็คือมีความเค้นจุดครากต่ำ และมีความไวสูงต่อการแตกร้าวความเค้นกัดกร่อน ในอีกนัยหนึ่ง เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรท์จะมีความแข็งแรงจุดครากสูง และมีความต้านทานมากต่อการแตกร้าวความเค้นกัดกร่อน แต่จะมีสมบัติการอ่อนตัวและความเหนียวที่ต่ำ และมีความเปราะด้วย ด้วยเหตุนี้เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรท์จึงไม่เป็นผลดีที่จะใช้เป็นเหล็กโครงสร้างสามารถพูดได้ว่าเหล็กกล้าทั้งสองชนิดนี้มีคุณลักษณะต่าง ๆ ที่ตรงข้ามกันดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมคุณภาพสูงจึงได้ถูกพัฒนาให้เป็นวัสดุที่มีข้อดีของทั้งเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนท์และเฟอร์ไรท์

รายละเอียดโดยทั่ว ๆ ไปของเหล็กกล้าไร้สนิมคุณภาพสูง ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 8 SUS.329 J1 ถูกบรรจุอยู่ใน JIS ในปี 1972 และ SUS.329 J2L ในปี 1982

##### 2.4.1.1 ลักษณะเด่นของโลหะขึ้นงาน (Features of base metal)

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมคุณภาพสูงมีพื้นเป็นเฟอร์ไรท์และออสเทนไนท์ รูปถ่ายที่ 2.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปของโลหะขึ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมคุณภาพสูง ตามรูปนั้น ออสเทนไนท์จะขยายไปตามทิศทางของการรีด และกระจายอยู่ในพื้นของเฟอร์ไรท์

ข้อดีอย่างหนึ่งของเหล็กกล้าไร้สนิมคุณภาพสูงคือมีความต้านทานสูงมากต่อการเกิดหลุม (pitting) และการแตกร้าวความเค้นกัดกร่อนในสถานะของคลอไรด์ รูปที่ 2.38 แสดงผลทดสอบการแตกร้าวความเค้นกัดกร่อน ในการดัมสารละลายของ 42%  $MgCl_2$  ผลการทดสอบบ่งชี้

ความเค้นวิกฤติที่สูงกว่า และความต้านทานการแตกร้าวความเค้นกักคร่อนที่มากกว่าของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์โดยเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติก

ข้อดีอีกอย่างหนึ่งของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางกลคือมีความเค้นจุดครากที่สูง ตารางที่ 2.9 แสดงสมบัติทางกลของ SUS 329 J2L โดยเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าชนิด 304 และชนิด 410 ความแข็งแรงจุดคราก 0.2% ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ SUS 329 J2L จะมากเป็นสองเท่าของเหล็กกล้าชนิด 304 ความแข็งแรงทางดึงก็สูงด้วยเช่นกัน

เมื่อถูกใช้เป็นโครงสร้างที่ออกแบบมาให้ความเค้นสูง ๆ เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ก็แสดงให้เห็นเหตุผลในการลดความหนาของแผ่นชิ้นงาน

ความเหนียวของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ดีมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติก ดังแสดงในรูปที่ 2.39 อย่างไรก็ตาม ความเหนียวจะลดลงทันทีในที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ จึงไม่ถูกแนะนำให้ใช้ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน พิสัยการเป็นตัวนำความร้อนและสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ จะมีค่าอยู่ประมาณกึ่งกลางของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติกและเฟอร์ไรติก

#### 2.4.1.2 ความสามารถในการเชื่อม (Weldability)

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ปกติจะมีความต้านทานการแตกร้าวร้อนเพิ่มขึ้นเพราะว่าการเป็นของแข็งเฟสเดียวของเฟอร์ไรท์ ตารางที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบความต้านทานการแตกร้าวร้อนโดยการทดสอบความเครียดเป็นจุด ความต้านทานการแตกร้าวร้อนของโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จะถูกวิเคราะห์โดยความยาวรอยแตกทั้งหมดที่ค่อนข้างน้อยกว่าโลหะรอยเชื่อมชนิด 308L มีอยู่ประมาณ 10% ของเฟอร์ไรท์ แต่ก็ยังดีกว่าโลหะรอยเชื่อมออสเทนไนติกที่สมบูรณ์ของชนิด 310 และอินโคเนล 625 ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถพิจารณานำมาใช้งานได้เป็นอย่างดี

สำหรับความต้านทานการแตกร้าวเย็นนั้น ไม่มีรอยแตกร้าวปรากฏให้เห็นในการทดสอบรอยเชื่อมร่องตัว U และการทดสอบรอยเชื่อมหลายชั้น ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จะปราศจากการแตกร้าวเย็นเกือบทั้งหมดภายใต้การนำไปใช้งานในลักษณะต่าง ๆ

#### 2.4.1.3 สมบัติของบริเวณรอยเชื่อม (Properties of welded zone)

โลหะชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ถูกให้ความร้อนที่ 1000-1100°ซ. หลังจากผ่านการรัดมาแล้ว และถูกทำให้คงตัวรักษาโครงสร้างเหมือนกับที่อุณหภูมิการให้ความร้อนนั้น ในโลหะรอยเชื่อม ในทางกลับกัน เฟอร์ไรท์จะแข็งตัวตามลำดับเป็นอันดับแรก และระหว่างขบวนการของการเย็นตัวลงออสเทนไนท์ก็จะตกผลึกในพื้นที่ของเฟอร์ไรท์ ด้วยเหตุนี้โครงสร้างก็จะไม่คงตัว

จำนวนของออสเตนไนท์ที่ตกผลึกในโลหะรอยเชื่อมก็จะน้อยด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชิ้นงานของส่วนผสมเดียวกัน

รูปถ่ายที่ 2.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะรอยเชื่อมเมื่ออยู่ในสภาวะเชื่อมเสร็จแล้ว กลุ่มออสเตนไนท์จะตกผลึกตามขอบเกรนของเฟสเฟอร์ไรต์ การกระจายตัวและปริมาณของเฟสเฟอร์ไรต์/ ออสเตนไนท์ จะแปรเปลี่ยนตามส่วนผสมทางเคมีของโลหะรอยเชื่อมและการกระทำทางความร้อนด้วย สมบัติต่าง ๆ ของโลหะรอยเชื่อมจะแปรเปลี่ยนไปด้วย

รูปที่ 2.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟอร์ไรต์ในโลหะรอยเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ และการลดลงของน้ำหนักโดยการกัดกร่อน เมื่อปริมาณเฟอร์ไรต์เพิ่มขึ้น ความต้านทานการกัดกร่อนเป็นหลุมก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ปริมาณนิเกิลที่สูงขึ้นจะให้ความต้านทานการกัดกร่อนเป็นหลุมสูงขึ้น

รูปที่ 2.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟอร์ไรต์ และพลังงานที่รับได้ของโลหะรอยเชื่อมที่  $-46^{\circ}\text{C}$ . จากการเชื่อมอาร์คก๊าซคลุมและการเชื่อมทิกพลังงานที่รับได้จะลดลงเมื่อปริมาณเฟอร์ไรต์เพิ่มขึ้น

ตามที่กล่าวถึงข้างต้น โลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จำเป็นต้องควบคุมปริมาณเฟอร์ไรต์และออสเตนไนท์ให้เหมาะสมในการพิจารณาถึงความต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติการกระแทก ในกรณีของวัสดุงานเชื่อมสลับเปลือง ปริมาณนิเกิลเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชิ้นงาน เพราะว่าปริมาณเฟอร์ไรต์ของโลหะรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมมาแล้วต้องรักษาไว้ที่ประมาณ 50% ตารางที่ 2.11 แสดงตัวอย่างของส่วนผสมทางเคมีและสมบัติของวัสดุงานเชื่อมสลับเปลืองสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ความเปราะเฟสซิกม่า และความเปราะ  $475^{\circ}\text{C}$ . เกิดขึ้นเมื่ออยู่ในกรณีของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติก

รูปที่ 2.42 แสดงการเปลี่ยนแปลงในค่าการกระแทกเมื่อเหล็กกล้า SUS 329 J2L ถูกกระทำทางความร้อนเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิที่บ่งชี้ไว้ ค่าการกระแทกจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเป็น  $475^{\circ}\text{C}$  และประมาณ  $800-900^{\circ}\text{C}$ . ด้วยแนวโน้มนี้ทำให้ความเปราะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น นี่ก็ชี้ให้เห็นว่าการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ไม่อาจจะเอาไปใช้ได้ในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ๆ หรือเมื่อจำเป็นต้องทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

## 2.4.2 เหล็กกล้าไร้สนิมไนโตรเจนสูง

### (High Nitrogen Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมความแข็งแรงสูงทำได้โดยการเติมไนโตรเจนเข้าไปในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติกกำลังเป็นที่ถูกใจในการแนะนำเข้าสู่อุตสาหกรรม เพราะว่าข้อดีของมันในการลดการออกแบบความหนาของแผ่นลงได้ เป็นต้น การเติมไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติกไม่ได้ใช้เฉพาะสำหรับการใช้งานในอุณหภูมิปกติเท่านั้นแต่ยังนำไปใช้งานในอุณหภูมิสูงด้วย เมื่อเร็ว ๆ นี้ การนำเหล็กกล้าชนิดนี้ไปใช้งานสำหรับอุปกรณ์ที่มีอุณหภูมิต่ำมาก ๆ ก็ถูกพิจารณาถึงด้วย

ในปี 1981 JIS ได้ตั้งมาตรฐานเหล็กกล้าไร้สนิมไนโตรเจนสูงเป็น 5 ชนิด คือ SUS 304 N1 , 304 N2 , 304 LN , 316 N และ 316 LN นอกจากนี้เหล็กกล้า 317 LN ก็ได้เข้าสู่ตลาดและถูกใช้งานแล้วเช่นกัน

### 2.4.2.1 สมบัติของโลหะชิ้นงาน

#### (Characteristics of base metal)

การเติมไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติก จะเพิ่มทั้งความแข็งแรงทางดึงและความเค้นจุดคราก 0.2% การเติมไนโตรเจนนี้มีผลในอุณหภูมิต่าง ๆ กันดังแสดงในรูปที่ 43 เพิ่มความแข็งแรงการคืบแตกของเหล็กกล้าชนิดนี้ รูปที่ 44 แสดงความแข็งแรงการคืบแตก (creep-rupture strength) 100 ชม. ของเหล็กกล้าชนิด 316 L ซึ่งเติมไนโตรเจนเข้าไปผลที่น่าสังเกตที่ถูกบันทึกไว้เมื่อปริมาณไนโตรเจนต่ำกว่า 0.12% และอุณหภูมิต่ำกว่า 650°ซ. ความต้านทานการกัดกร่อนเป็นหลุมก็สามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการเติมไนโตรเจน

การนำเหล็กกล้าชนิด 316 N และ 317 LN ไปใช้งานเป็นถึงเก็บสารเคมีกำลังเพิ่มขึ้นมากซึ่งเป็นผลจากความพยายามในการลดความหนาของแผ่นชิ้นงานโดยการเพิ่มความแข็งแรงของเหล็กและปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อนให้ดีขึ้น

### 2.4.2.2 ความสามารถในการเชื่อม

#### (Weldability)

แม้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมไนโตรเจนสูงจะมีข้อดีตามที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่ว่าไนโตรเจนก็สามารถให้ผลตรงกันข้ามของความสามารถในการเชื่อมของเหล็กกล้านี้

รูปที่ 2.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในโลหะรอยเชื่อมอาร์คก๊าซคลุมชนิด 308 และจำนวนโพรงก๊าซที่พบในโลหะรอยเชื่อม จำนวนของโพรงก๊าซจะเพิ่มขึ้น

อย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณไนโตรเจนเกิน 0.2% ความสามารถในการละลายตัวของไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมจะแปรเปลี่ยนตามส่วนผสมของเหล็กกล้า และพบได้ว่ามีประมาณ 0.2% การเพิ่มโพรงก๊าซในทันทีในรูปที่ 2.45 ถูกพิจารณาว่ามีสาเหตุจากการเติมไนโตรเจนมากเกินไปกว่าช่วงที่สามารถละลายตัวได้ในโลหะรอยเชื่อม 308

ไนโตรเจนเป็นธาตุที่ทำให้เกิดสแตมไนท์ก่อตัวได้แรงมาก ปริมาณเฟอร์ไรท์จะลดลงเมื่อปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้น เมื่อเฟอร์ไรท์ในโลหะรอยเชื่อมลดลง หรือโลหะรอยเชื่อมมีสแตมไนท์เต็มที่จะทำให้ความไวในการแตกร้าวร้อนก็เพิ่มขึ้นเพื่อที่จะป้องกันสิ่งนี้ ปริมาณเฟอร์ไรท์ของวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองไนโตรเจนสูงต้องถูกควบคุมโดยนิเกิลและโครเมียม และโลหะรอยเชื่อมถูกปรับก็จะทำให้มันมีเฟอร์ไรท์อยู่หลายเปอร์เซ็นต์ดังแสดงในรูปที่ 2.12

#### 2.4.2.3 สมบัติของบริเวณรอยเชื่อม

##### (Properties of welded zone)

การเติมไนโตรเจนช่วยเพิ่มความแข็งแรง และความต้านทานการกัดกร่อนเป็นหลุมของโลหะรอยเชื่อม รูปที่ 2.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนและความแข็งแรงของโลหะรอยเชื่อม 308 ความแข็งแรงทางดึงและความเค้นจุดคราก 0.2% ของโลหะรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในโลหะรอยเชื่อม 308 และการกัดกร่อนที่ทดสอบโดยการกัดกร่อนเป็นหลุมตามรูปที่ แสดงความต้านทานการกัดกร่อนเป็นหลุมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้น

#### 2.4.3 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรท์กิบริสุทธิสูง

##### (High Purity Ferritic Stainless Steel)

การผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรท์กิบริสุทธิสูงซึ่งปัจจุบันนี้สามารถทำการลดคาร์บอน , ไนโตรเจน และธาตุเจืออื่น ๆ ในเหล็กกล้า เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรท์กิบริสุทธิสูงจะมีโครเมียม 16% หรือมากกว่าและยังมี 1-2% โมลิบดีนัม ที่ช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในสถานะของไอออนคลอรีน (Chlorine iron) เหล็กชนิดนี้มีหลายชนิดซึ่งมีปริมาณที่น้อยมากของไนโอเบียมและไททาเนียมถูกเติมลงไปเพื่อลดผลตรงข้ามของคาร์บอนและไนโตรเจนตกค้าง และรวมตัวกันได้เป็นไนไตรด์และคาร์ไบด์ เหล็กกล้าชนิดนี้แสดงอยู่ในตารางที่ 2.13 และเป็นมาตรฐานของ JIS ในปี 1981

#### 2.4.3.1 คุณลักษณะต่าง ๆ ของโลหะขึ้นงาน

##### (Characteristics of base metal)

เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติกบริสุทธิ์สูง มีความต้านทานที่สูงมากต่อการแตกร้าว ความเค้นกักคร่อนในสภาวะของออสเทนไนต์ ซึ่งเป็นสภาวะปรปักษ์มากที่สุดสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติก การทำให้บริสุทธิ์ยังช่วยให้มีความเหนียวรอยบากเพิ่มมากขึ้นด้วยเมื่อเทียบกับชนิด 430 ที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติกชนิดทั่วไปในรูปที่ 2.48 แสดงอิทธิพลของคาร์บอนและไนโตรเจนที่มีผลต่อความเหนียว ซึ่งจากรูปสามารถเข้าใจได้ว่าการลดลงของธาตุเหล่านี้เป็นผลให้ความเหนียวลดลง

#### 2.4.3.2 ความสามารถในการเชื่อม

##### (Weldability)

ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติกบริสุทธิ์สูงโดยใช้วัสดุงานเชื่อมสัณเปลี่ยนที่เหมือนกันมีความจำเป็นที่จะต้องจำกัดสิ่งแปลกปลอมเช่น คาร์บอน , ไนโตรเจน และออกซิเจนให้น้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้ กรรมวิธีการเชื่อมที่สามารถใช้ได้ก็คือการเชื่อมทิก และการเชื่อมมิกซึ่งสามารถทำให้โลหะรอยเชื่อมมีคาร์บอนและออกซิเจนที่ต่ำได้ง่าย อย่างไรก็ตามโลหะรอยเชื่อมที่เหมือนกับโลหะขึ้นงานนั้นจะทำได้โดยเฉพาะความเหนียวรอยบากที่ไม่ดี เนื่องจากเหตุผลดังต่อไปนี้

1. การจำกัดให้คาร์บอนในโลหะรอยเชื่อมต่ำกว่า 0.010% ทำได้ยาก
2. มีเกรนขยายใหญ่เนื่องมาจากความร้อนเข้าจากการเชื่อม

ด้วยเหตุผลเหล่านี้ การเชื่อมด้วยโลหะที่เหมือนกันจึงไม่นำมาใช้มากนัก

ในตารางที่ 2.14 แสดงตัวอย่างของโลหะรอยเชื่อมการเชื่อมทิกที่ใช้ SUS444 ชนิดเส้นลวดเชื่อม ความแข็งแรงและความยึดตัวเป็นที่น่าพอใจ แต่ค่าการกระแทกจะต่ำมาก

จากเหตุผลเหล่านี้ แนวทางการบำรุงรักษาและการจัดการสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมถึงเก็บน้ำร้อน (SAS B51) แนะนำให้ใช้ลวดเชื่อมชนิด Y316 L และ Y309 L ลวดเชื่อมออสเทนไนติกเหล่านี้ถูกใช้อย่างมากในการทำงานเชื่อมจริง ๆ

เหมือนกับโลหะรอยเชื่อมที่ส่วนผสมเหมือนโลหะขึ้นงาน บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ของเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์สูงแสดงเกรนที่ใหญ่มากขึ้น ในภาพถ่ายที่ 2.6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมมิกของโลหะขึ้นงานชนิด 444 (4t) ด้วยเส้นลวดเชื่อม E316L เกรนใน HAZ ใกล้เคียงกับแนวเส้นประสานจะขยายมากขึ้น ดังนั้นในการทำงานเชื่อมจริง ๆ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องรักษาความร้อนเข้าจากการเชื่อมให้ต่ำมากที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อที่จะป้องกันกการเกิดเกรนขยาย

#### 2.4.4 เหล็กกล้าไร้สนิมที่การแข็งตัวตกตะกอน

##### (Precipitation Hardening Stainless Steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมที่การแข็งตัวตกตะกอนเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมความแข็งแรงสูง ชนิดหนึ่ง ซึ่งเติมธาตุทองแดง อลูมิเนียม โมลิบดีนัม ไททาเนียม และไนโอเบียม เพื่อเพิ่มความแข็งแรงในขณะเดียวกันก็ยังรักษาความต้านทานการกัดกร่อนได้สูง ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของเหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิมที่การแข็งตัวตกตะกอนนี้มีคุณลักษณะที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. มีความอ่อนตัวในเงื่อนไขเมื่อถูกอบละลายตัว ทำให้ง่ายในการขึ้นรูป
2. สามารถทำให้มีความแข็งแรงสูงโดยการทำเอจิง (aging) ที่เหมาะสม (การแข็งตัวตกตะกอน)
3. ความต้านทานการกัดกร่อน สามารถเทียบได้กับเหล็กกล้าไร้สนิมแรกเริ่ม

เหล็กกล้าไร้สนิมที่การแข็งตัวตกตะกอนถูกแบ่งได้หลาย ๆ 4 ชนิดคือ ชนิด SUS630 เมื่อต้องการทำการเอจิงหลังจากการอบละลายตัว (Solution treatment) เหล็กกล้า SUS630 นี้จะแข็งตัวที่อุณหภูมิระหว่าง  $370^{\circ}\text{C}$  และ  $600^{\circ}\text{C}$ . การเปลี่ยนแปลงสมบัติโดยการเอจิงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ดังเช่นตามที่ได้แสดงในตารางที่ 2.16 และการควบคุมช่วยอุณหภูมิการเอจิงที่ละเอียดแม่นยำมากก็เป็นสิ่งที่จำเป็น

เหล็กกล้า SUS630 มีความสามารถในการเชื่อมสูง และกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กก๊าซ คลุมกับกรรมวิธีการเชื่อมทิกก็ใช้ได้เช่นเดียวกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติกแรกเริ่ม อย่างไรก็ตาม SUS630 จะมีความไวต่อการแตกร้าวที่สูง การดูแลรักษาอย่างเหมาะสมจะกระทำในระหว่างการเชื่อมจริง ๆ มิฉะนั้นจะเป็นสาเหตุให้เกิดการกินลึก (undercut) และสิ่งบกพร่องในการเชื่อมอื่น ๆ

ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม SUS630 ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมเหมือนกับโลหะชิ้นงานก็จะถูกนำมาใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.17

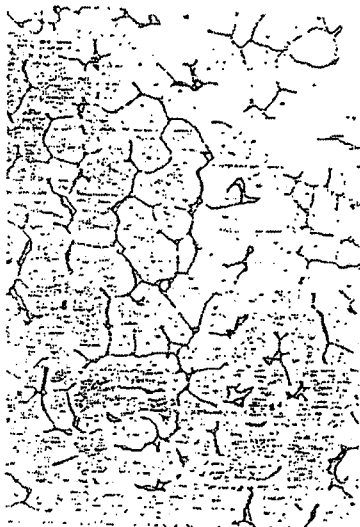
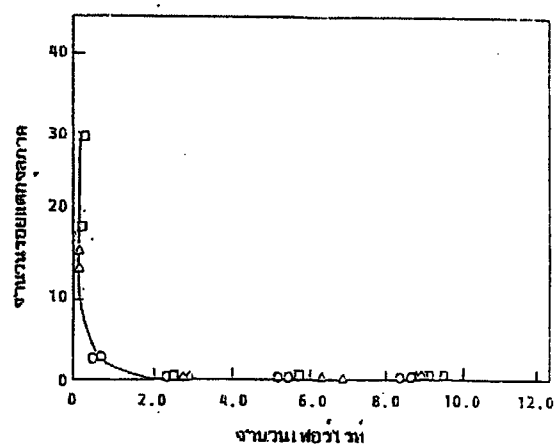
ความแข็งแรงของโลหะรอยเชื่อมที่เทียบได้กับโลหะชิ้นงานที่ใช้การอบแข็งตัวตกตะกอน

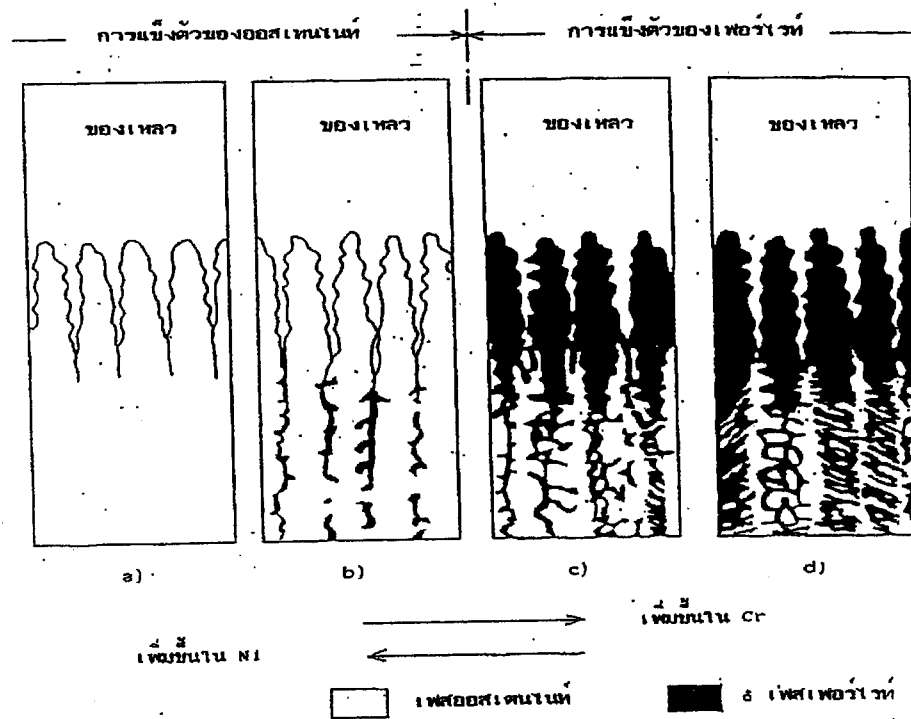
#### 2.5 ตาราง, รูป, ภาพถ่ายต่างๆ



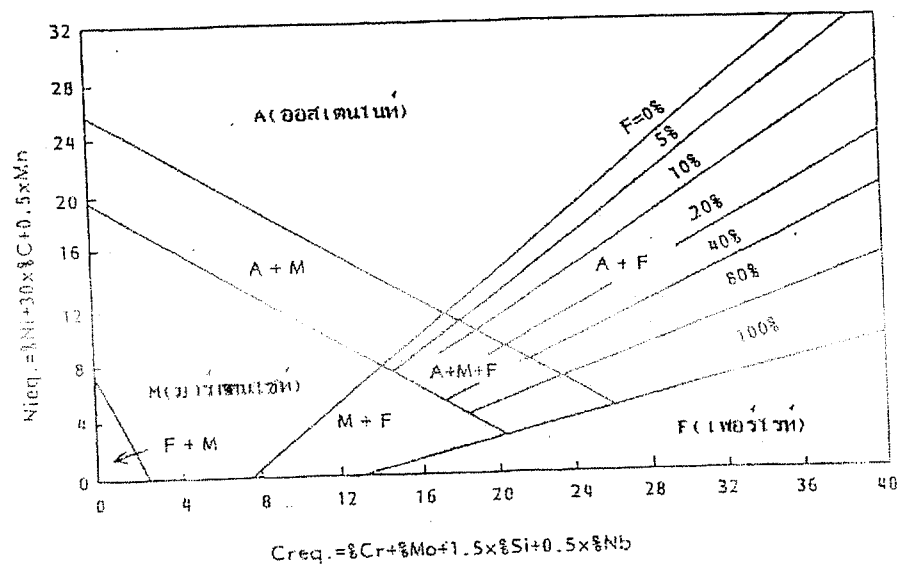
ตาราง 2.1 แสดงสมบัติทางฟิสิกส์ของเหล็กกล้าไร้สนิมทั่วไป

ชนิด	สมบัติทางฟิสิกส์					
	ความกว้าง จำเพาะ	ความต้านไฟฟ้า $\mu\Omega \cdot m$	ความ เป็นแม่เหล็ก	ความร้อน จำเพาะ $cal/g \cdot ^\circ C$ (0~100°C)	สัมประสิทธิ์ การขยายตัว $10^{-6}/^\circ C$ (0~100°C)	ความนำความร้อน $10^{-2} cal/cm/sec \cdot ^\circ C$ (100°C)
เหล็กคาร์บอน	7.86	15	○	0.12	11.4	11.2
เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนไนต์ (ชนิด 304)	7.93	72	×	0.12	17.3	3.89
เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทนไซต์ (ชนิด 410)	7.75	57	○	0.11	9.9	5.95
เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ไรต์ (ชนิด 430)	7.70	60	○	0.11	10.4	6.24

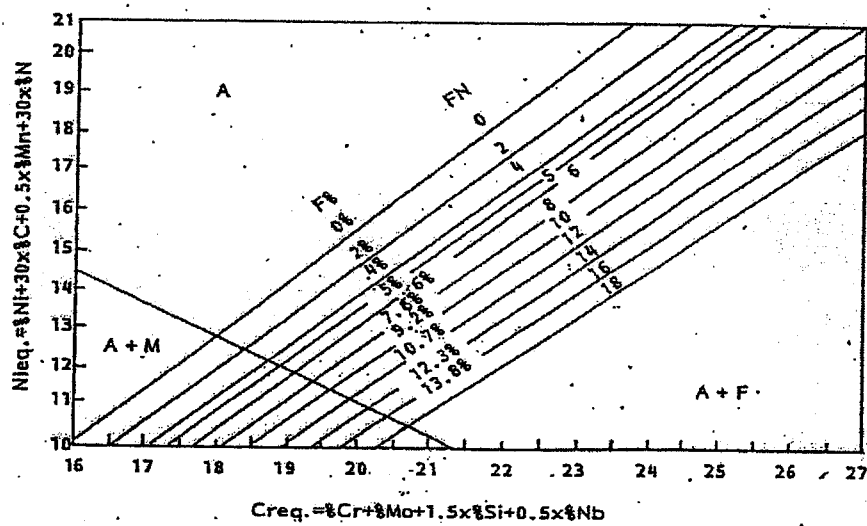
รูปถ่ายที่ 2.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะรอยเชื่อม  
ชนิด 308 (X400)รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างรอย  
แตกร้าวขนาดเล็กและจำนวนโพร์ไรท์  
(รอยแตกร้าวขนาดเล็กในรอยเชื่อม E308)



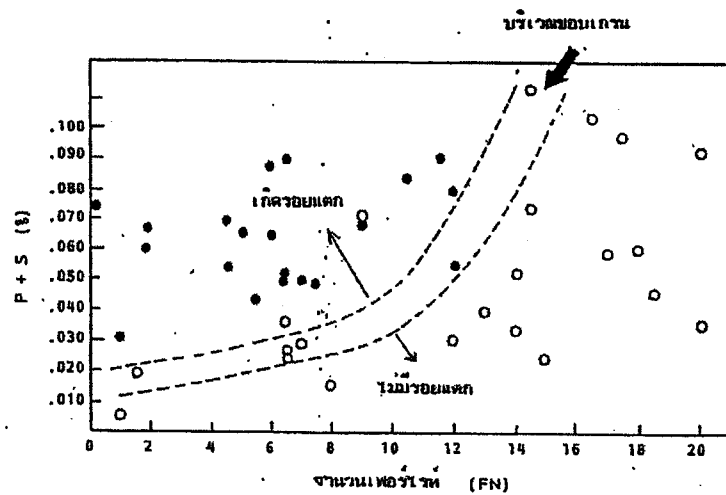
รูปที่ 2.2 การแข็งตัวของเหล็กกล้าไร้สนิม



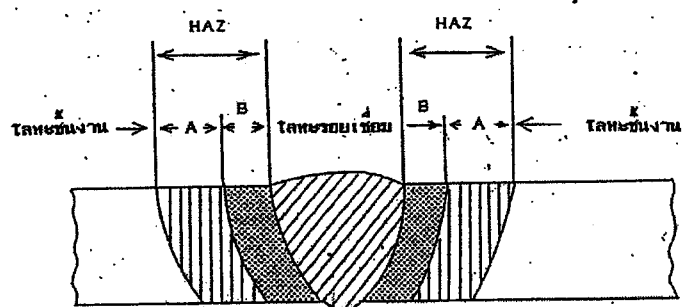
รูปที่ 2.3 แผนภาพของเซฟเฟิลเลอร์ (Schaeffler's Diagram)



รูปที่ 2.4 แผนภาพของเคอลอง (Delog's Diagram)



รูปที่ 2.5 ผลของฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์ และจำนวนเฟอร์ไรท์ (FN) ต่อความไวในการแตกร้าวร้อนของโลหะรอยเชื่อมชนิด 309

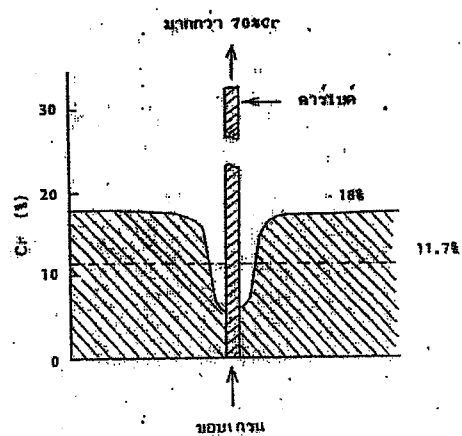


รูปที่ 2.6 ภาพรอยเชื่อมต่อของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติก

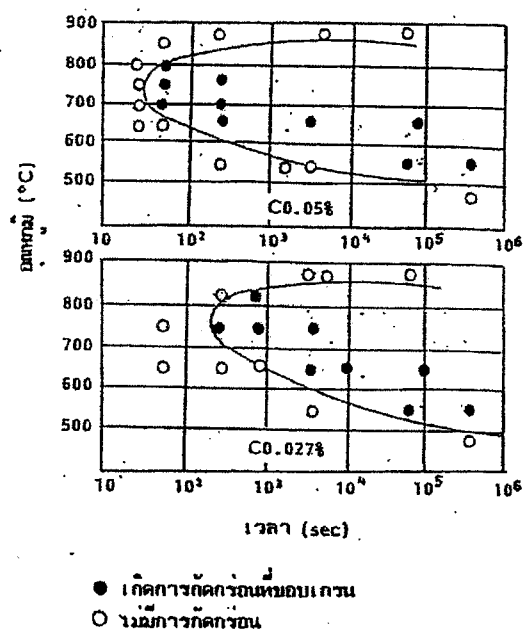
UAZ = บริเวณกระทบร้อน

A = บริเวณคาร์ไบด์ตกตะกอน

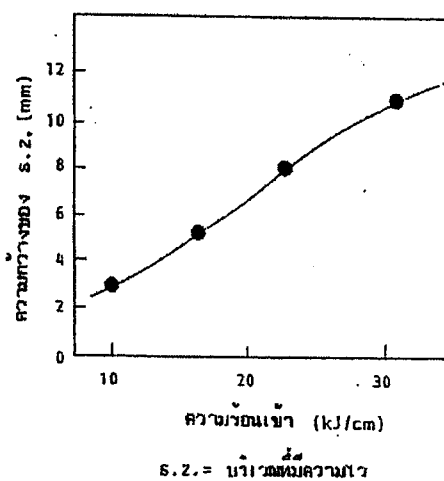
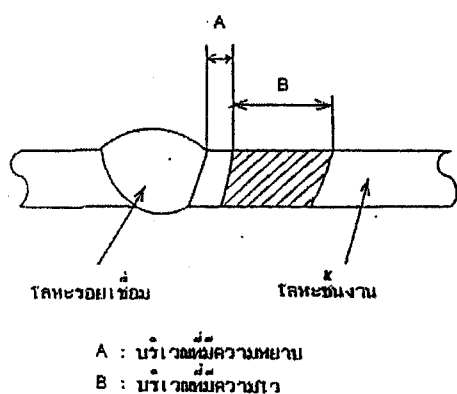
B = บริเวณอบละลายตัว



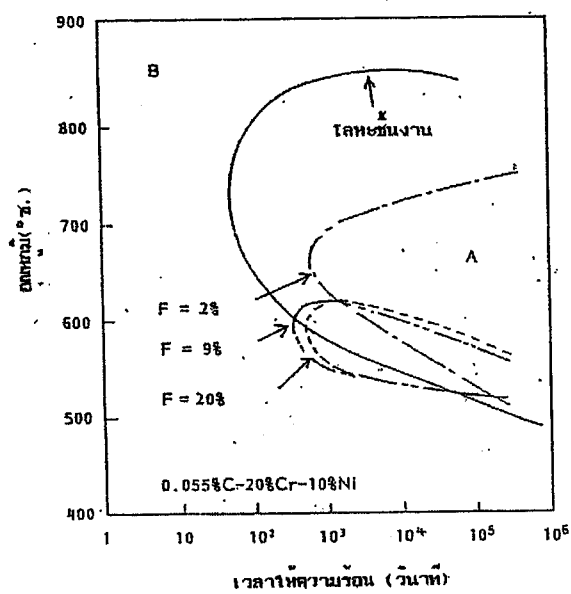
รูปที่ 2.7 การกระจายตัวของโครเมียมที่กระจุกตัวใกล้กับขอบเกรนที่เกิดการ  
กัดกร่อนตามขอบเกรน



รูปที่ 2.8 ผลของเวลาและอุณหภูมิต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน  
(เหล็กกล้าไร้สนิม 18Cr-8Ni)



รูปที่ 2.9 ผลของความร้อนเข้าในการเชื่อมต่อการเชื่อมของรอยเชื่อม

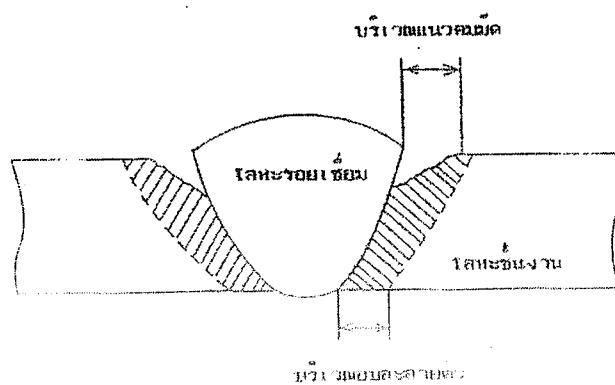


รูปที่ 2.10 ผลของปริมาณเฟอร์ไรต์ต่อบริเวณที่มีความไวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 308

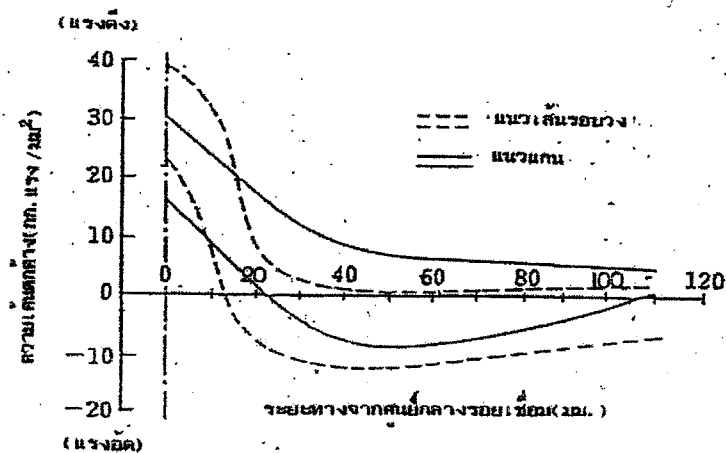
A = เกิดการกัดกร่อนที่ขอบเกรน

B = ไม่มีการกัดกร่อน

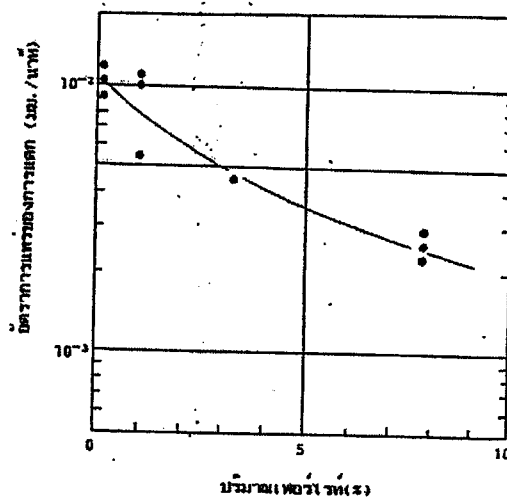
F = เปอร์เซ็นต์เฟอร์ไรต์



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่แนวคอด



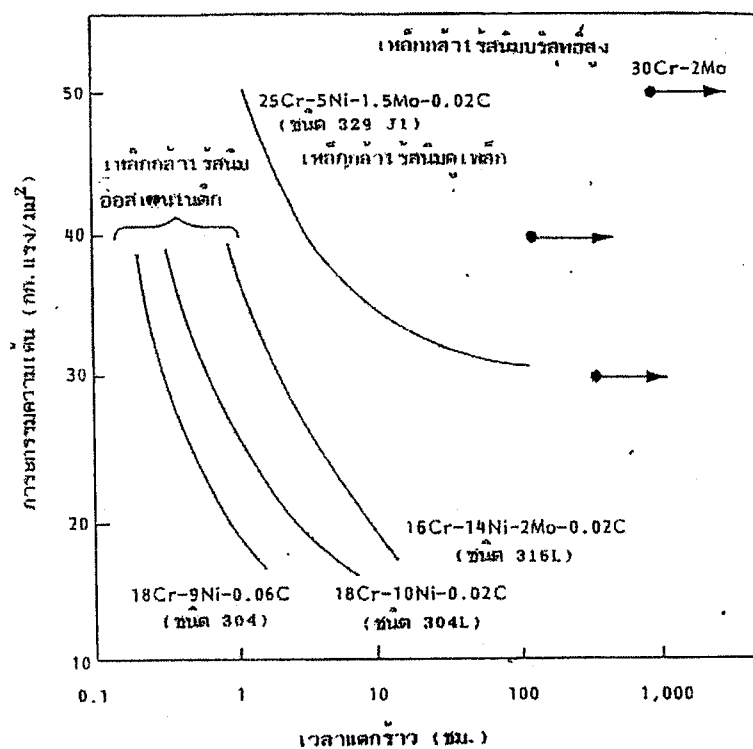
รูปที่ 2.12 การกระจายตัวของความเค้นตกค้างในรอยเชื่อมต่อท่อ SUS 304



รูปที่ 2.13 ผลของปริมาณเฟอร์ไรท์ต่อความไวในการแตกร้าความเค้นกักตร้อนของโลหะ  
รอยเชื่อม ชนิด 308 (ต้มในสารละลาย 42%  $MgCl_2$ )

ตารางที่ 2.2 ความเค้นตกค้างในโลหะรอยเชื่อมโดยการอบลดความเค้น

อุณหภูมิให้ความร้อน (°C)	การทดลองของค่าความเค้นตกค้าง (%)
500	25
600	35
700	45
800	60
900	85

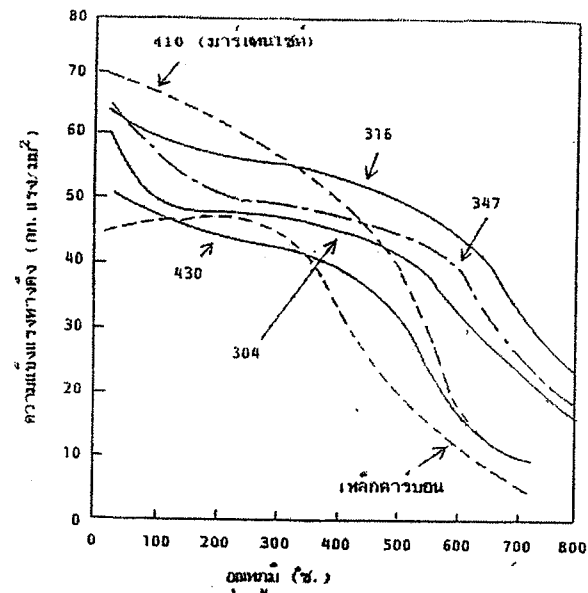


รูปที่ 2.14 ความต้านทานต่อการแตกร้าวความเค้นกักกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์สูงและเหล็กกล้าไร้สนิมดuple

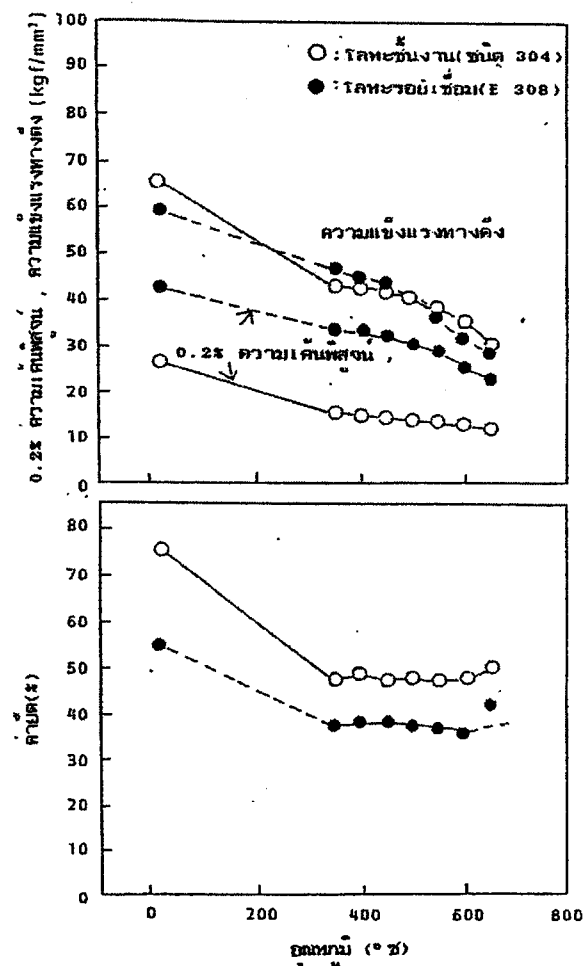
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิห้อง

ประเภท	สมบัติทางกล			
	2.0%ความเค้นพิสูจน์ N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	ความแข็งแรง ทางดึง N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	ค่ายืด %	ค่าการกระแทก 2mmV Notch at 20°C J (kg*m)
โลหะรอยเชื่อม (E308)	402 (41)	578 (59)	47	74 (7.5)
โลหะขึ้นงาน (ชนิด 304)	245 (25)	588 (60)	60	118 (12)

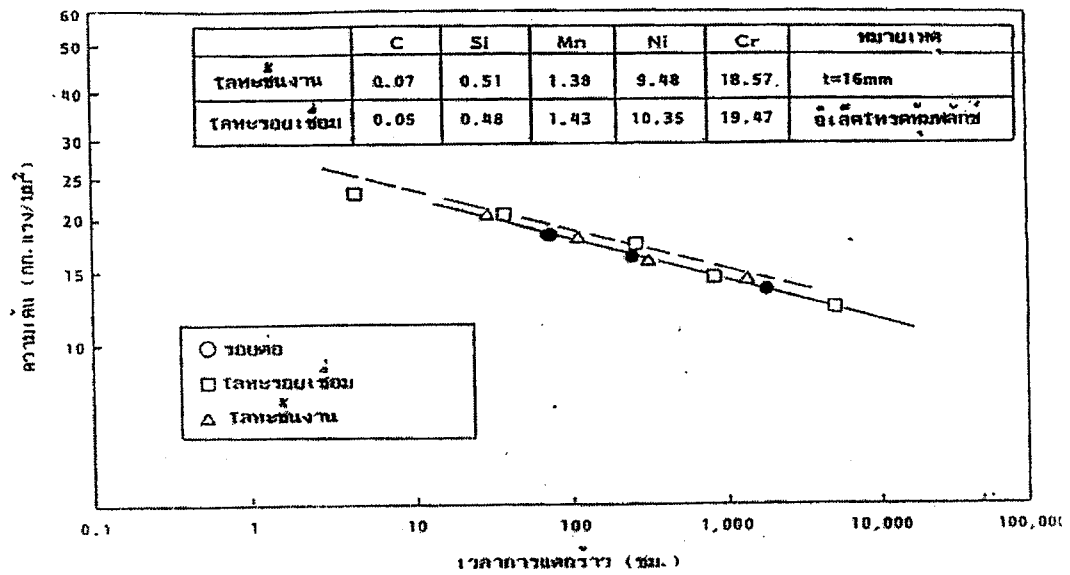




รูปที่ 2.15 ความแข็งแรงทางดึงของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดต่างๆ

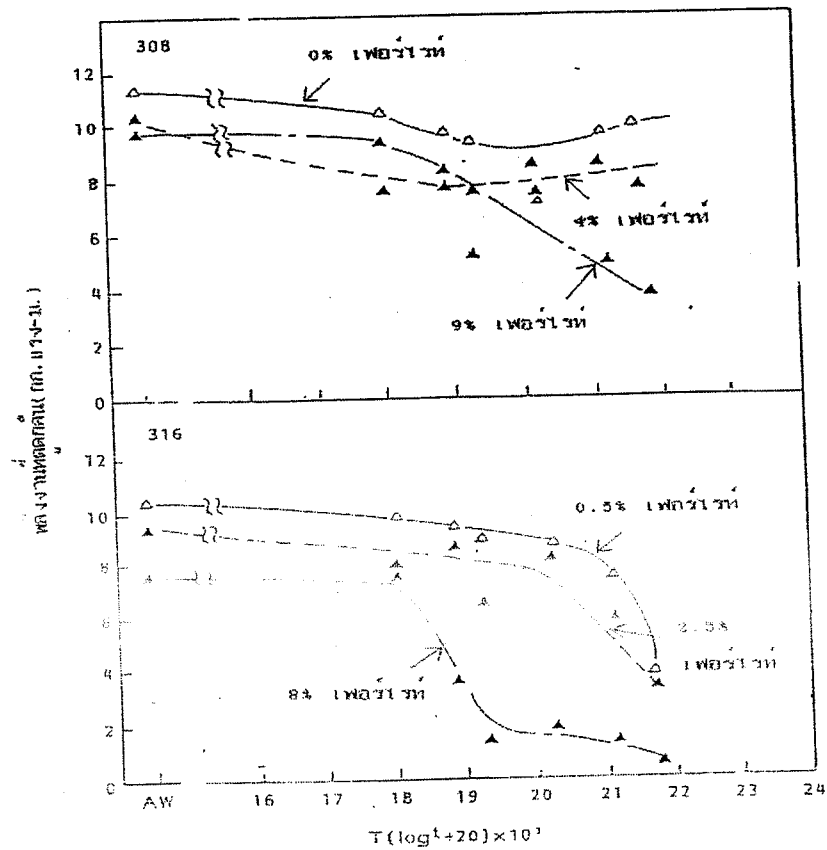


รูปที่ 2.16 สมบัติทางดึงของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติกและเฟอร์ริติก

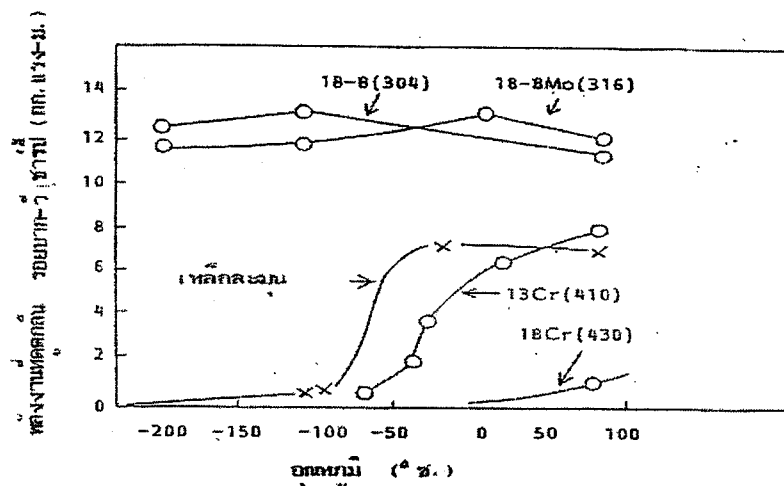


รูปที่ 2.17 ความแข็งแรงการคืบแตกของโลหะขึ้นงานกับโลหะรอยเชื่อมชนิด 308

(ผ่านการเชื่อมมาแล้ว, อุณหภูมิทดสอบ = 650 ช.)

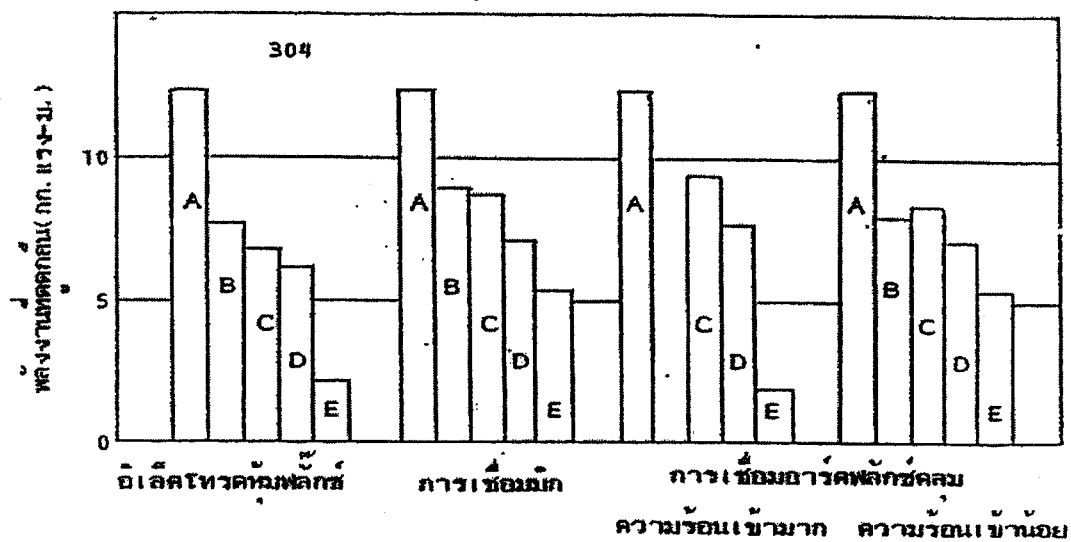


รูปที่ 2.18 ผลของการเอียงจึงต่อความเหนียวรอยบอดของโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม



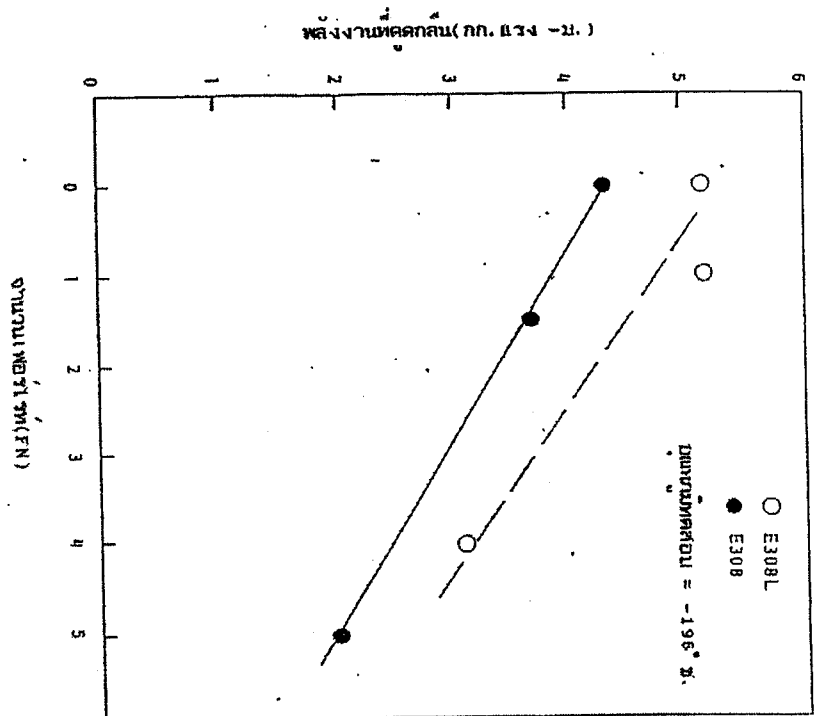
รูปที่ 2.19 ความเหนียวรอบของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดต่างๆ

อุณหภูมิทดสอบ = -196 °C.

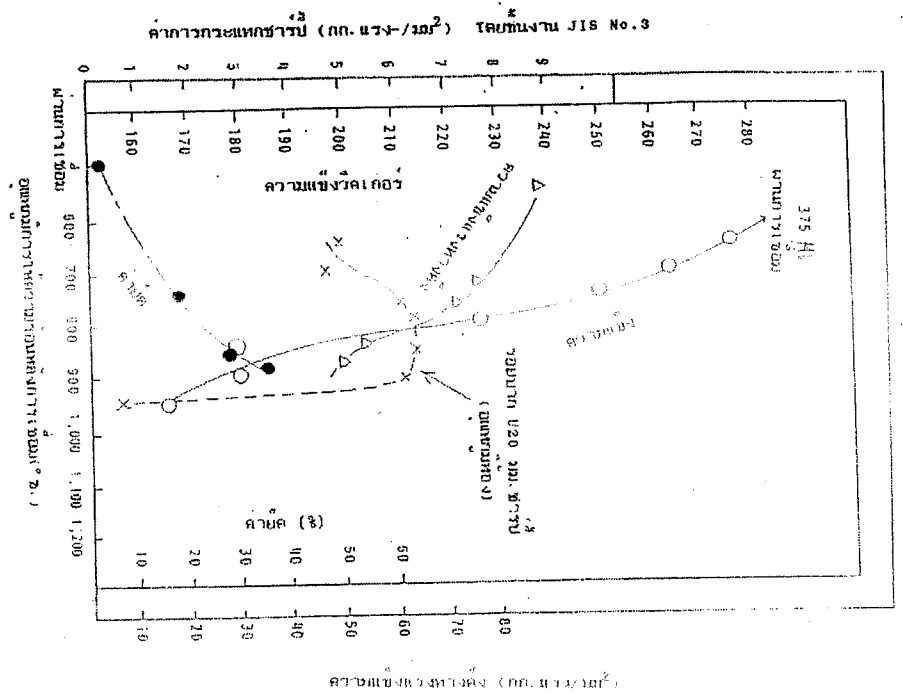


- A โลหะขึ้นงาน
- B บริเวณกระแทกร้อน (12.7 มม. จากแนวเชื่อม)
- C บริเวณกระแทกร้อน (3.2 มม. จากแนวเชื่อม)
- D บริเวณกระแทกร้อน (1.6 มม. จากแนวเชื่อม)
- E โลหะรอยเชื่อม

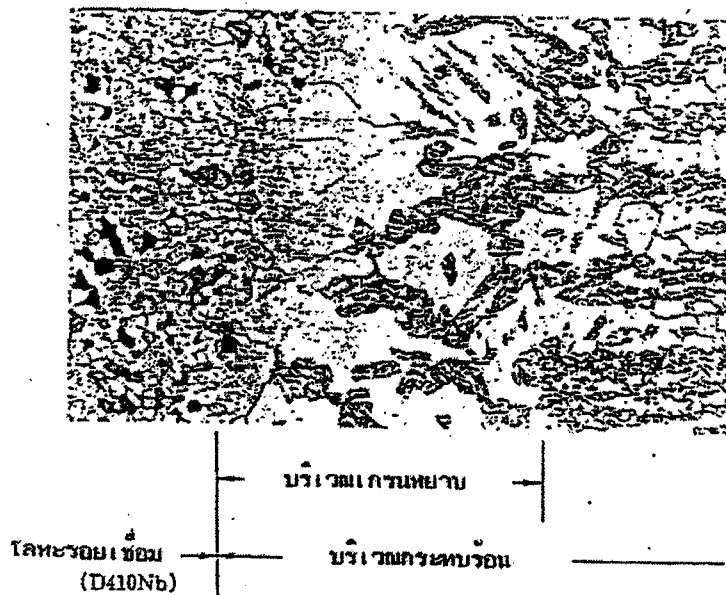
รูปที่ 2.20 ความเหนียวรอบของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม



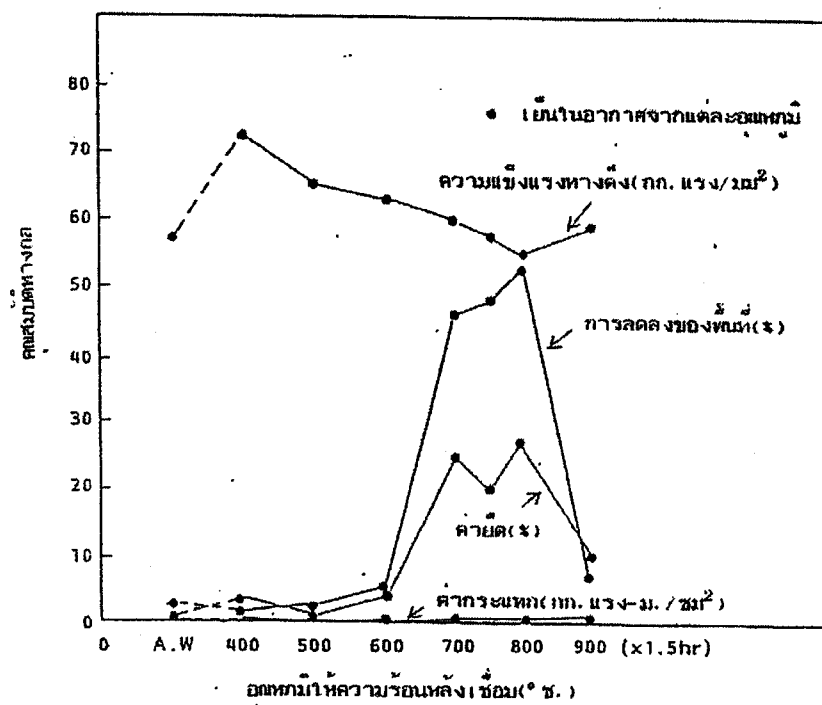
รูปที่ 2.21 ผลของปริมาณเฟอร์ไรต์ต่อความเหนียวรอยร้าวที่อุณหภูมิต่ำ



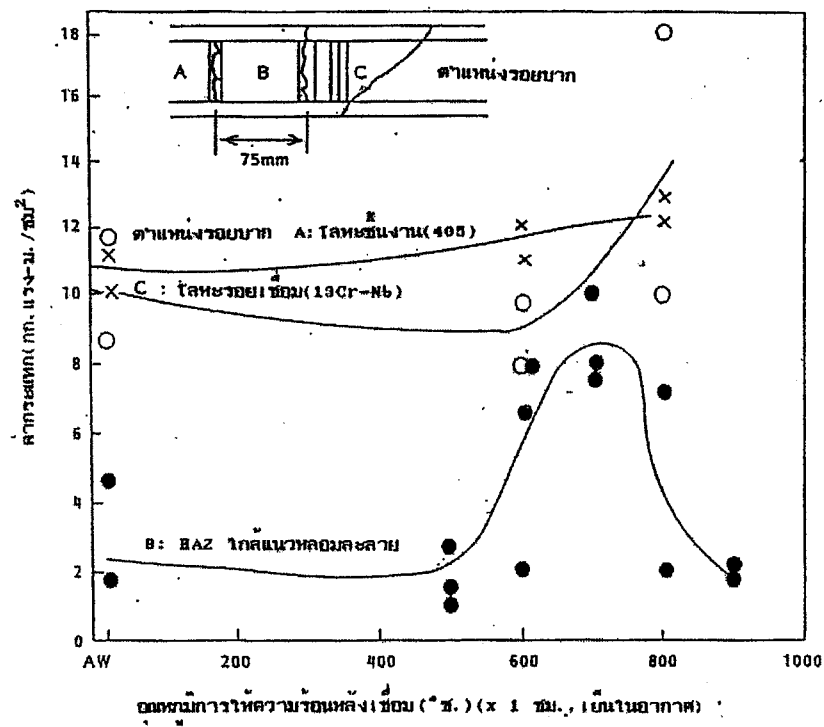
รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของโลหะรอยเชื่อม E410 (13Cr) โดยการใช้ความร้อนหลังการเชื่อม



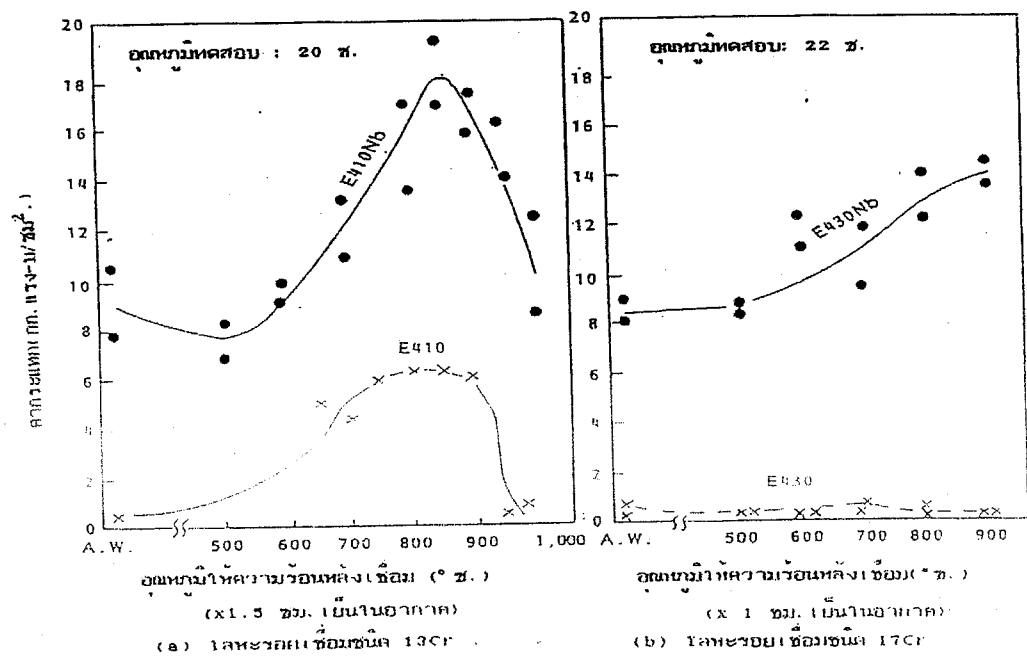
รูปถ่ายที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม SUS405 (X150)



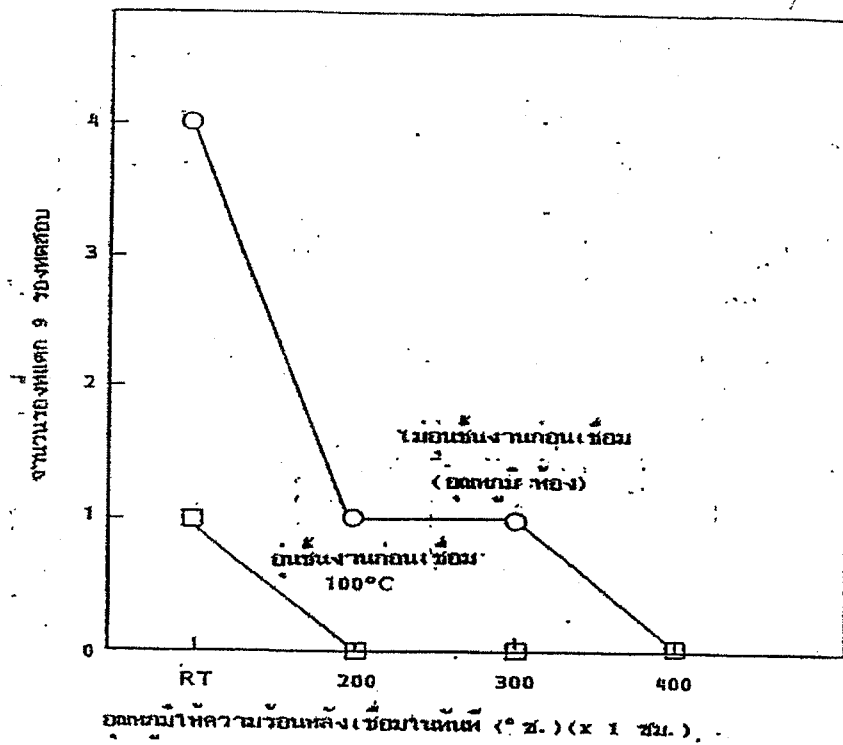
รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของโลหะรอยเชื่อม E430 (17Cr) โดยการให้ความร้อนหลังการเชื่อม



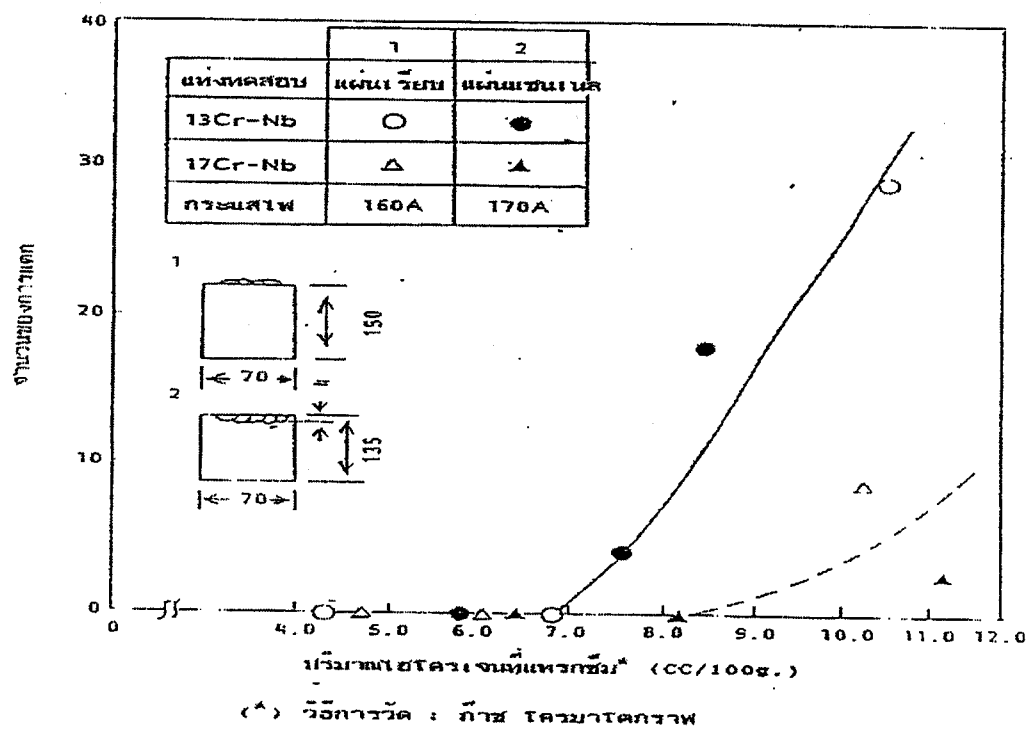
รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวรอยบัดกรีของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติก โดยการให้ความร้อนหลังการเชื่อม



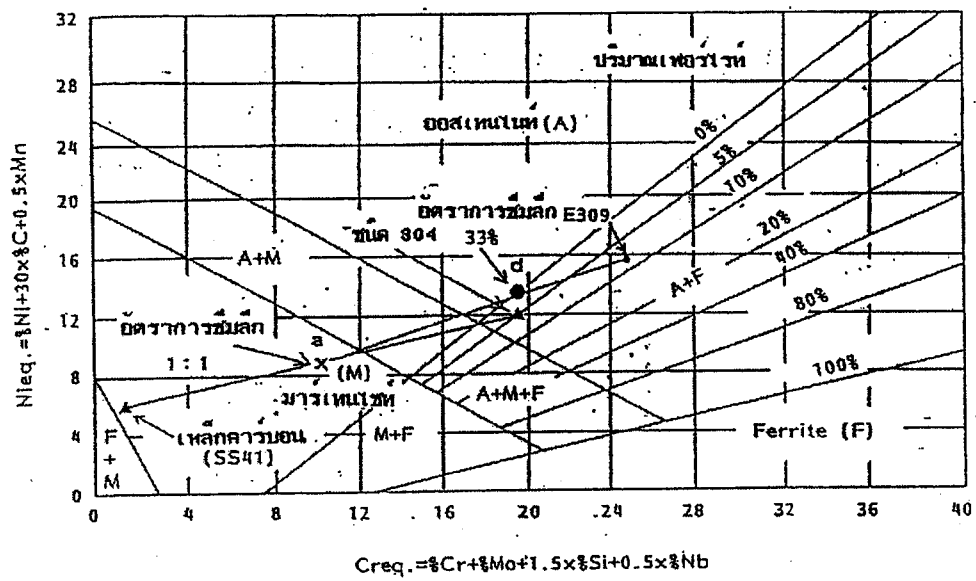
รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงความเหนียวรอยบัดกรีของโลหะรอยเชื่อมชนิด 13Cr และ 17Cr โดยการให้ความร้อนหลังการเชื่อม



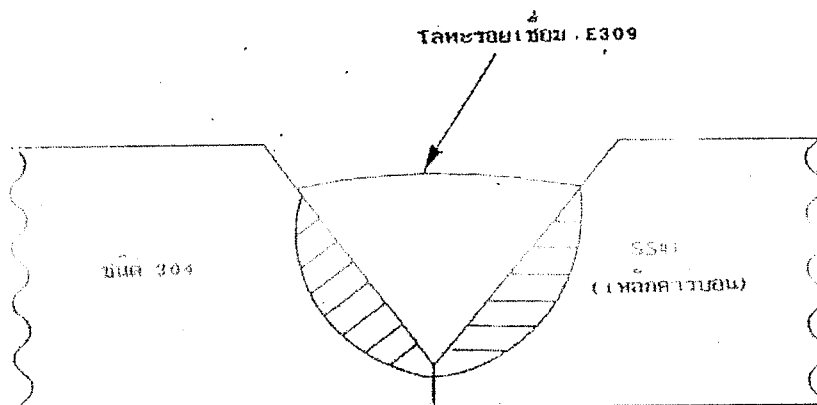
รูปที่ 2.26 ผลของการให้ความร้อนเชื่อมและการให้ความร้อนหลังเชื่อมในทันที ต่อการทดสอบการแตกร้าวร่องตะเข็บเชื่อมชั้นเดียวของแท่งลวดเชื่อม E430Nb



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนในการเชื่อมอาร์คก๊าซคลุมและการแตกร้าวที่เนิ่นนาน

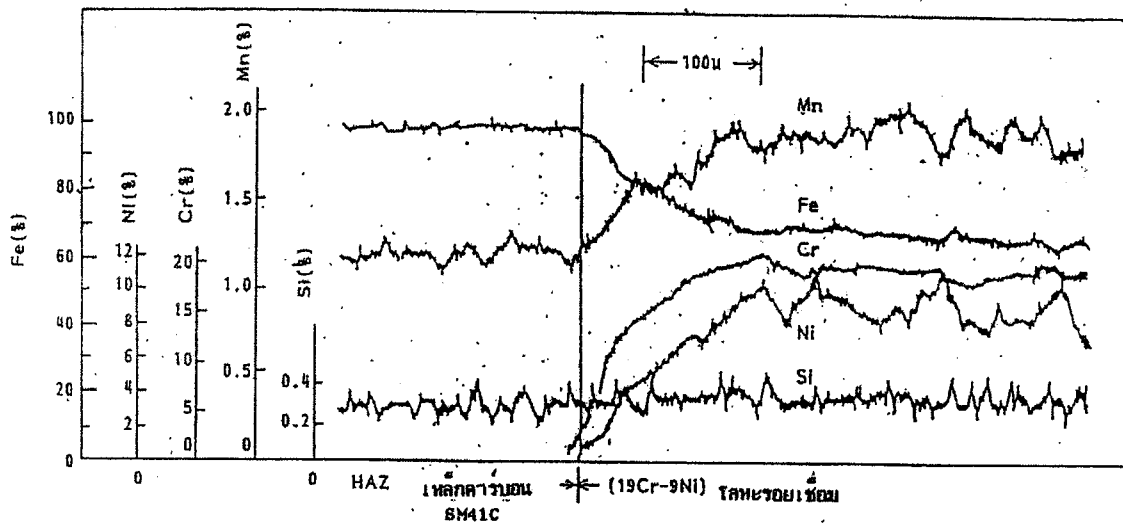


รูปที่ 2.28 แผนภาพของเซฟไฟเลอร์สำหรับการประมาณส่วนผสมทางเคมีของโลหะ  
รอยเชื่อมที่เป็นการเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน

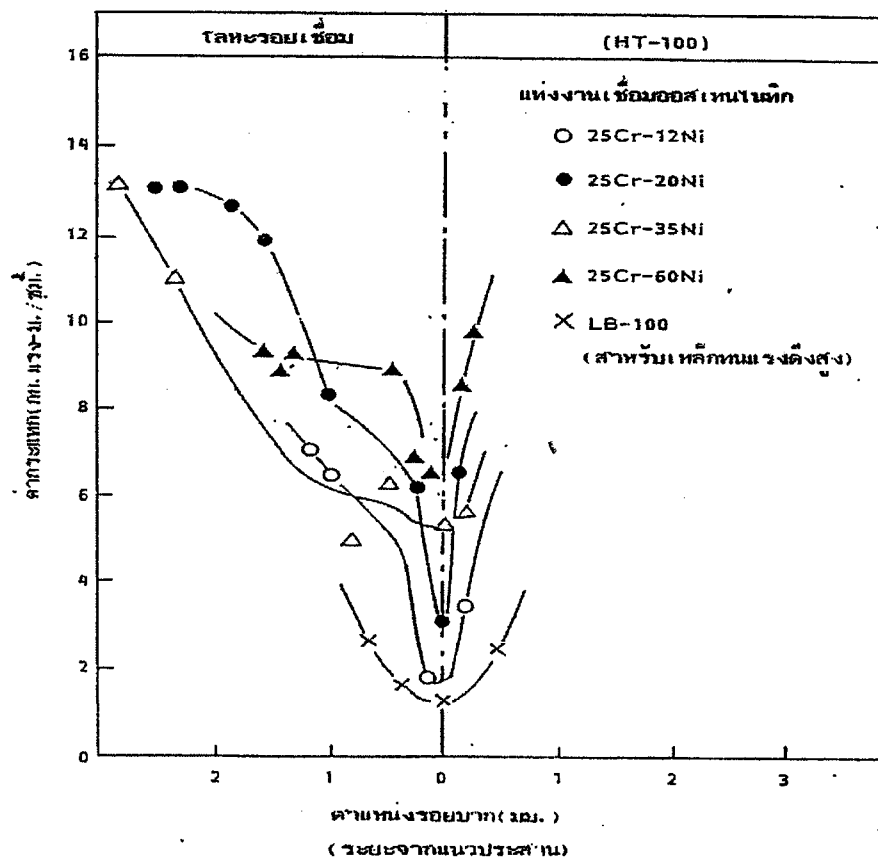


รูปที่ 2.29 ภาพแสดงรอยเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน

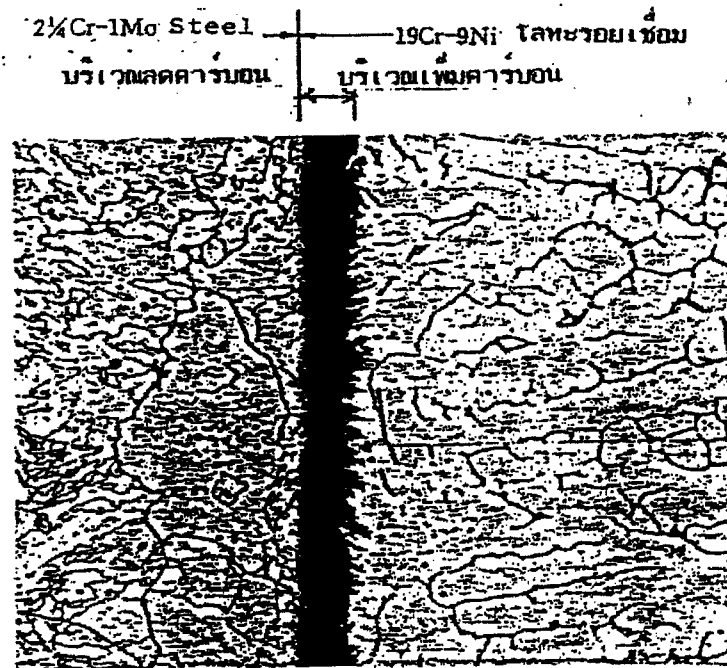




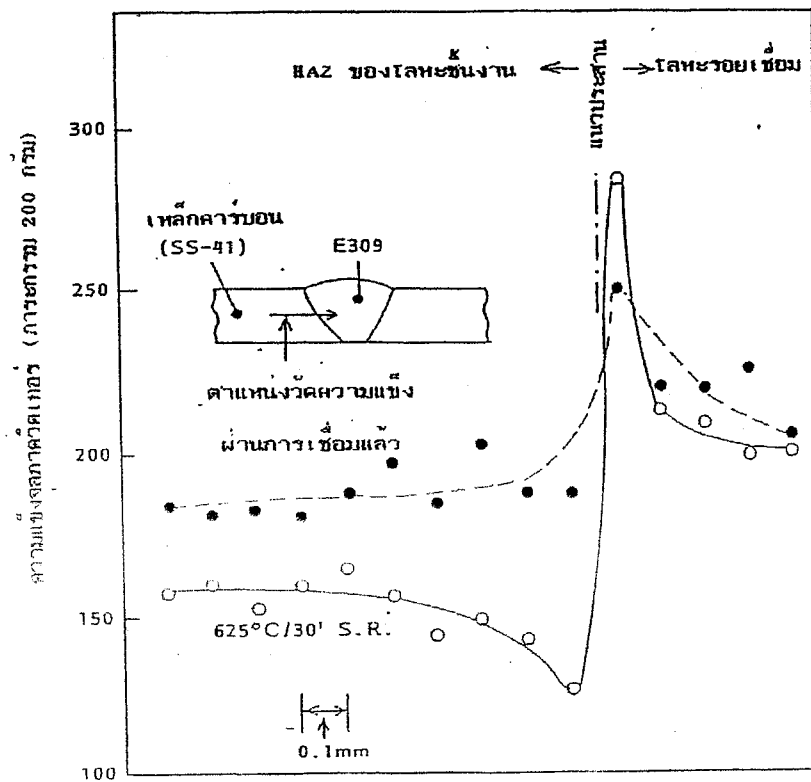
รูปที่ 2.30 การกระจายตัวของธาตุเจือต่างๆ รอบแนวเส้นประสานของโลหะขึ้นงานเหล็กคาร์บอนกับโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม



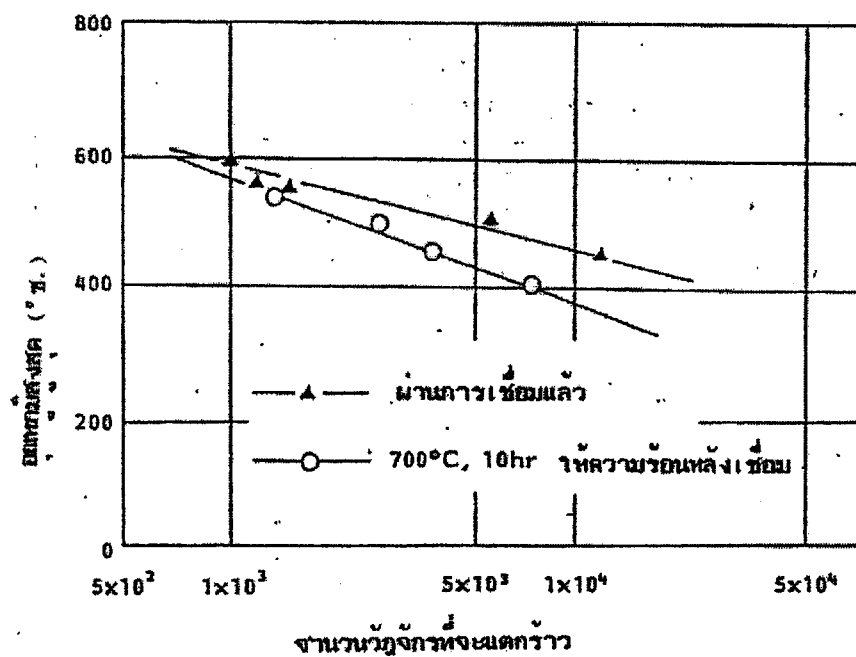
รูปที่ 2.31 ความเหนียวรอยบากใกล้กับแนวเส้นประสานของการเชื่อมต่อชนร่องตัววีของเหล็กทนแรงดึงสูง HT-100



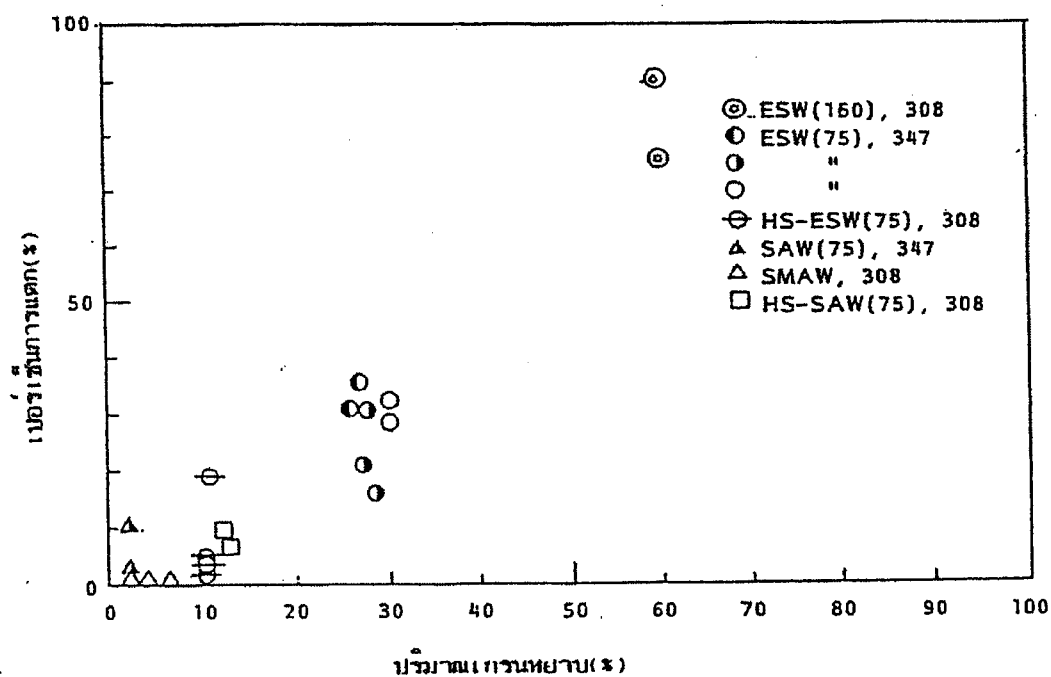
รูปถ่ายที่ 2.3 บริเวณเพิ่มคาร์บอนและบริเวณลดคาร์บอนเมื่อให้ความร้อนหลังการเชื่อม (x200)



รูปที่ 2.32 การกระจายตัวของความแข็งแรงรอยเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดกัน



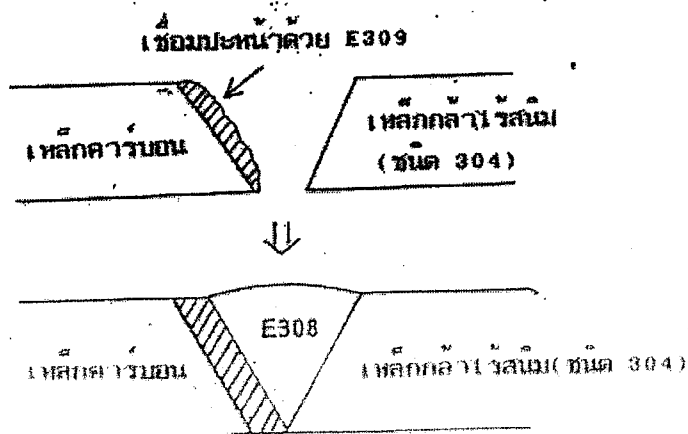
รูปที่ 2.33 ผลของการทดสอบการล้าทางความร้อนในรอยเชื่อมต่อดังชนิดกัน  
(2.25Cr-1Mo + E309 Weld metal + Type 304 L)



รูปที่ 2.34 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของกรนหยาบกับความไวในการแตกร้าวของ  
การไม่ประสานกัน (ตัวเลขในวงเล็บแสดงความกว้างของแผ่นอิเล็กโทรด)

ตารางที่ 2.4 วัสดุในการเชื่อมที่สามารถใช้ได้กับการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดกัน

โลหะชิ้นงาน A โลหะชิ้นงาน B	เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนไนติก (ชนิด 304, 316, 347 เป็นต้น)	เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ไรติกและ มาร์เทนไซต์ (ชนิด 405, 410, 430 เป็นต้น)
เหล็กคาร์บอนและ เหล็กกล้าเจือต่ำ	ลวดเชื่อมชนิด 309 ลวดเชื่อมอิน โคนेल	ลวดเชื่อมชนิด 430, 430Nb และชนิด 309 ลวดเชื่อมอิน โคนेल
เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไร ติกและมาร์เทนไซต์	ลวดเชื่อมชนิด 309 ลวดเชื่อมอิน โคนेल	ลวดเชื่อมชนิด 410, 410Nb ลวดเชื่อมชนิด 430, 430Nb
เหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนไนติก	ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออส เทนไนติก	ลวดเชื่อม 430, 430Nb และชนิด 309

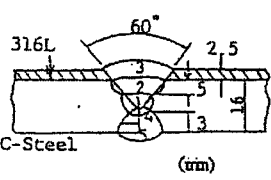
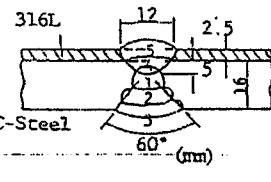


รูปที่ 2.35 ตัวอย่างการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันของแผ่นชิ้นงานหนา

ตารางที่ 2.5 วัสดุในการเชื่อมที่สามารถใช้ได้กับเหล็กกล้าชั้นเคลือบ

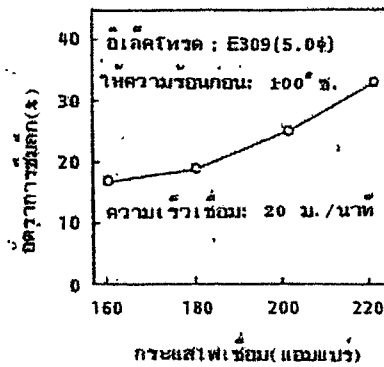
ชนิดของ เหล็กชั้นเคลือบ	ชั้น พื้น	ลวดเชื่อม
ชนิด 304(L)	ชั้น 1	ชนิด 309(L)
	ชั้น 2 และถัดไป Pass	ชนิด 308(L)
ชนิด 316(L)	ชั้น 1	ชนิด 309(L) หรือ 309Mo(L)
	ชั้น 2 และถัดไป Pass	ชนิด 316(L)
ชนิด 321 ชนิด 347	ชั้น 1	ชนิด 309(L) หรือ 309Nb
	ชั้น 2 และถัดไป Pass	ชนิด 347
ชนิด 405	ชั้น 1	ชนิด 309 หรือ 430Nb
	ชั้น 2 และถัดไป Pass	ชนิด 309 หรือ 410Nb

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบโดยเส้นลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

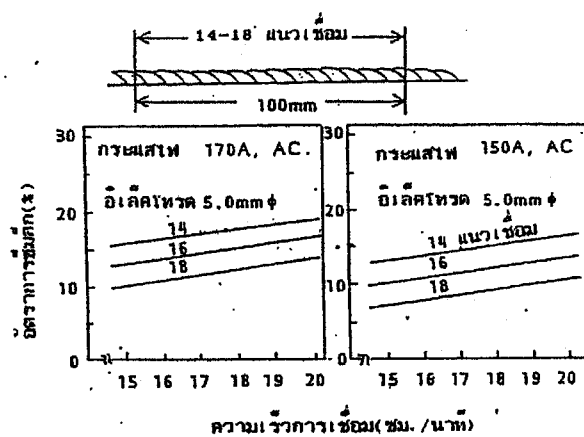
Symbol	รูปร่างของร่องและวิธีการต่อเกลย	ชนิดของ วัสดุ เคลือบ	วัสดุเชื่อม	เงื่อนไขการเชื่อมสำหรับบริเวณเคลือบ		
				กระแสไฟเชื่อม แอมแปร์ (DCRP)	เวลาต่อ วินาที	ความเร็วการเชื่อม มม. / นาที
A		SUS316L	① YFW-24 1.2mm ④ (สำหรับเส้นลวดเหล็กกล้าคาร์บอน)	200	28	18
			② YF-309MoL-C 1.6mm	② 200	28	18
			③ YF-316L-C 1.6mm	③ 200	28	18
B		SUS316L	① YFW-24 1.2mm ② (สำหรับเส้นลวดเหล็กกล้าคาร์บอน)	200	28	18
			④ YF-309MoL-C 1.6mm	④ 200	28	25
			⑤ YF-316L-C 1.6mm	⑤ 200	28	22

ตารางที่ 2.7 กรรมวิธีการเชื่อมที่ใช้กับการเชื่อมพอกเหล็กกล้าไร้สนิมและคุณลักษณะสำคัญ

กรรมวิธีการเชื่อม	คุณลักษณะที่สำคัญ
การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค (SMAW)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. อัตราการเผื่อจางปกติจะเป็น 15% ถึง 20%</li> <li>2. สามารถนำไปใช้งานได้กว้างเนื่องจากใช้ได้กับลวดเชื่อมที่มีอยู่อย่างมากมาย และไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์งานเชื่อมพิเศษ</li> </ol>
การเชื่อมทิก (GTAW)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. อัตราการเผื่อจางปกติจะถูกควบคุมที่ 10% ถึง 20%</li> <li>2. ควรใช้การเชื่อมอัตโนมัติเพื่อให้ได้อัตราการเผื่อจางที่คงที่</li> <li>3. สามารถใช้ได้กับโลหะรอยเชื่อมคาร์บอนต่ำ</li> <li>4. สามารถใช้ได้กับโลหะรอยเชื่อมที่มีความบริสุทธิ์สูง</li> </ol>
การเชื่อมอาร์คพลาสมา (PAW)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. อัตราการเผื่อจางน้อยกว่า 5% ด้วยการเชื่อมแบบกลับหัว</li> <li>2. ในการเชื่อมปกติ จะมีอัตราการเผื่อจาง 5% ถึง 10%</li> <li>3. ควรใช้การเชื่อมอัตโนมัติเพื่อให้ได้อัตราการเผื่อจางที่คงที่</li> <li>4. ประสิทธิภาพในการเชื่อมสามารถทำให้สูงขึ้นได้โดยการปรับระบบเส้นลวดอิเล็กโทรด และระบบเส้นลวดเชื่อมสองเส้น</li> </ol>
การเชื่อมมิก (GMAW)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. การเผื่อจางต้องลดลงจากการใช้เครื่องเชื่อมแบบพัลส์ซึ่งจะได้การเผื่อจางเป็น 20% ถึง 30%</li> <li>2. การเชื่อมอัตโนมัติมีความจำเป็นสำหรับอัตราการเผื่อจางที่คงที่</li> </ol>
การเชื่อมด้วยเส้นลวดเชื่อมไฟฟ้าฟลักซ์ (FCAW)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. อัตราการเผื่อจางปกติจะเป็น 20% ถึง 30%</li> <li>2. รูปร่างของตะเข็บเชื่อมจะดีกว่าการเชื่อมมิก</li> <li>3. ควรใช้การเชื่อมอัตโนมัติเพื่อให้ได้อัตราการเผื่อจางที่คงที่</li> </ol>
การเชื่อมพอกด้วยอิเล็กโทรดแบบแผ่น	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. อัตราการเผื่อจางเป็น 15%-20% สำหรับการเชื่อมอาร์ค ฟลักซ์คลุม, และ 5%-15% สำหรับการเชื่อมอิเล็กโทรดเปลือย</li> <li>2. ได้การเชื่อมพอกที่มีประสิทธิภาพสูงสุด</li> </ol>



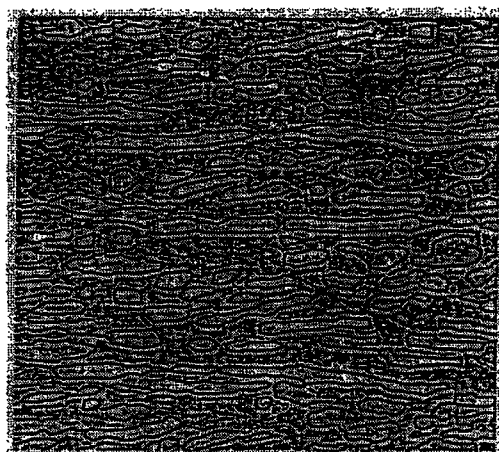
รูปที่ 2.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมลึกและกระแสไฟเชื่อม



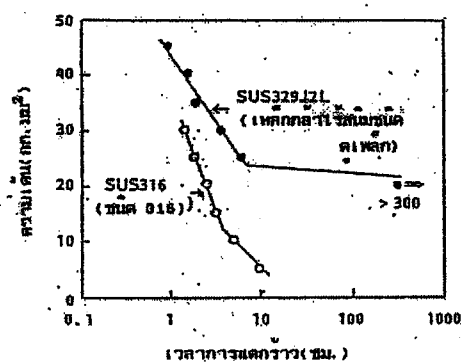
รูปที่ 2.37 ผลของการเกลี่ยตะเข็บเชื่อม (จำนวนของเทียวยเชื่อม/ความกว้าง 100 มม.)  
และความเร็วในการเชื่อมต่ออัตราการซึมลึกในการเชื่อมพอก

ตารางที่ 2.8 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

ชนิด	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
ASTM A669 (ท่อ)	≤0.030	1.40 ~2.00	1.20 ~2.00	≤0.030	≤0.030	4.25 ~5.25	18.0 ~19.0	2.50 ~3.00	—
ASTM A240 S3183 (แผ่น)	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.020	4.50 ~6.50	21.0 ~23.0	2.50 ~3.50	0.08 ~0.20
SUS 329J1 (JIS*)	≤0.080	≤1.00	≤1.50	≤0.040	≤0.030	3.00 ~6.00	23.0 ~26.0	1.00 ~3.00	—
SUS 329J2L (JIS*)	≤0.030	≤1.00	≤1.50	≤0.040	≤0.030	4.50 ~7.50	22.0 ~26.0	2.50 ~4.00	0.08 ~0.30



รูปถ่ายที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมชุบเคลือบของ SUS329 J2L (X400)

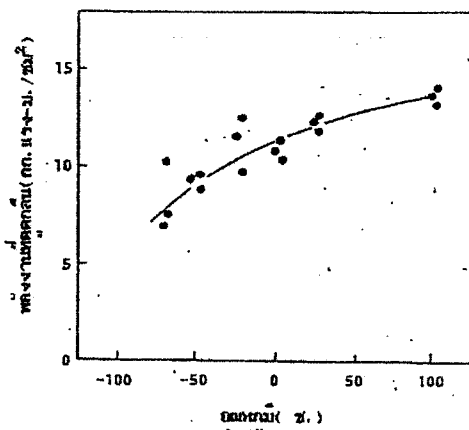


รูปที่ 2.38 ผลของการทดสอบการแตกร้าวจากความเค้นกัดกร่อนในสารละลาย 42%Mg  $Cl_2$  (เปรียบเทียบระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมชุบเคลือบกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติก)

ตารางที่ 2.9 การเปรียบเทียบความแข็งแรงของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดต่างๆ

ชนิด	0.2 ความแข็งแรงพิสูจน์ (กก./มม <sup>2</sup> )	ความแข็งแรงทางดึง (กก./มม <sup>2</sup> )	ค่ายืดทั้งหมด (%)
ชนิด 304	25	62	65
ชนิด 410	53	69	28
SUS329 J2L (JIS*)	62	83	36





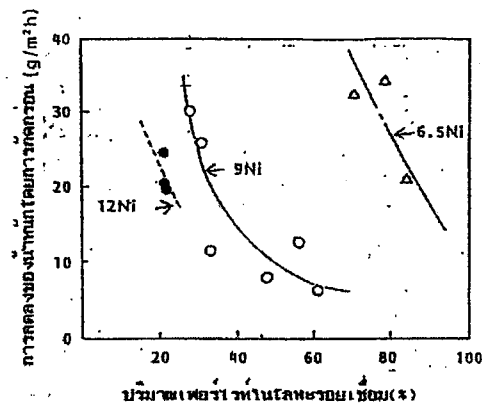
รูปที่ 2.39 ความเหนียวรอบของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

ตารางที่ 2.10 การเปรียบเทียบความต้านทานการแตกร้าวร้อนโดยการทดสอบกักตัวเป็นจุด

ชนิด	ส่วนผสมทางเคมีของโลหะรอยเชื่อม (น้ำหนัก)										ผลการทดสอบกักตัว เป็นจุด (ความยาว รอยแตกทั้งหมด, มม.)
	C	S	Mn	P	S	NI	Cr	Mo	N	Nb	
ชนิด 308L	0.031	0.29	1.53	0.027	0.003	9.99	20.48	—	0.026	—	1.4
เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์	0.034	0.47	1.07	0.018	0.004	9.11	24.76	3.31	0.13	—	2.7
ชนิด 310	0.032	0.51	4.62	0.005	0.003	21.78	24.56	2.19	0.14	—	6.0
เหล็กเจือ 625	0.063	0.29	0.86	0.003	0.003	60.63	20.15	8.56	0.013	3.31	12.7

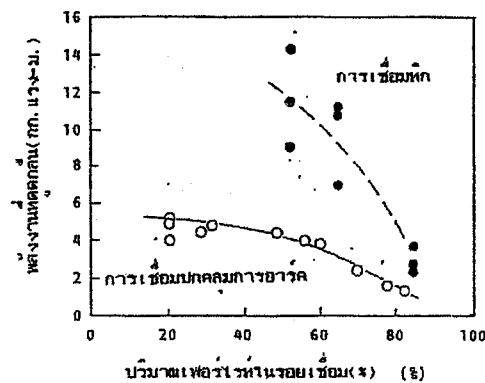


รูปถ่ายที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคของโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเมื่อเชื่อมแล้ว (x 400)



รูปที่ 2.40 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟอร์ไรท์ของโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม  
คูเพล็ก การลดลงของน้ำหนักโดยการกัดกร่อนเป็นหลุม (อิเล็กโทรดการเชื่อม  
อาร์คก๊าซคลุม, ในสภาวะเมื่อเชื่อมแล้ว)

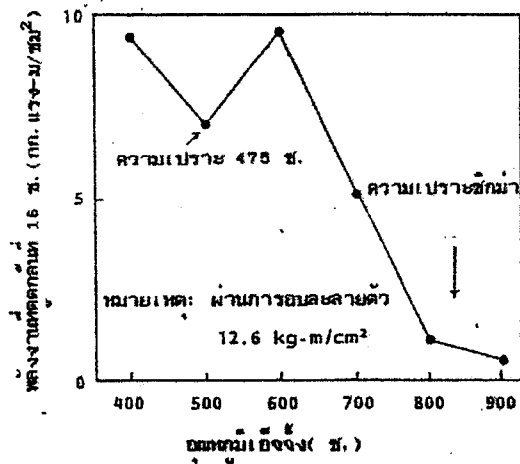
วิธีการทดสอบ : JIS G 0576 ; 50°C. X 24 ชม. , สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์



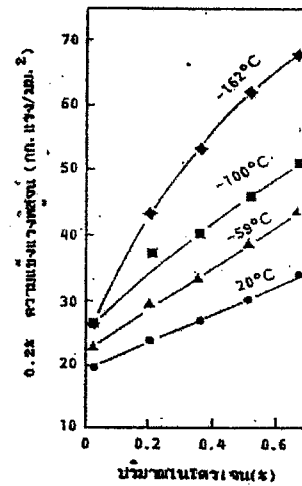
รูปที่ 2.41 ผลของเฟอร์ไรท์ต่อความเหนียวรอยบากของโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม  
คูเพล็ก (ในสภาวะเมื่อเชื่อมแล้ว)

ตารางที่ 2.11 ตัวอย่างของส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของวัสดุงานเชื่อมสำหรับ  
เหล็กกล้าไร้สนิมคูเพล็ก

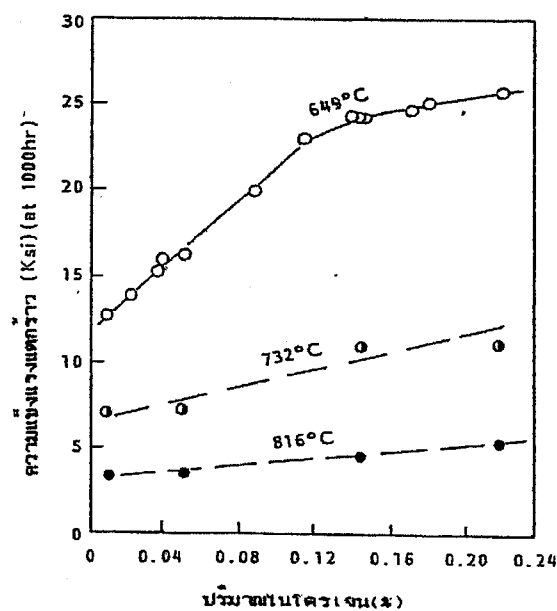
กรรมวิธี การเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อม (%)									ปริมาณ เฟอร์ไรท์ รอยเชื่อม (%)	ความแข็งแรงของ รอยเชื่อมต่อ	
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N		ความแข็งแรง ทางดึง (kg/mm <sup>2</sup> )	ตำแหน่ง การแตกหัก
SHAW	0.03	0.53	1.1	0.014	0.005	9.0	24.2	3.2	0.14	50	83.2	โลหะชิ้นงาน
GTAW	0.01	0.44	0.9	0.011	0.002	8.9	24.0	3.3	0.14	53	82.3	โลหะชิ้นงาน
ECW	0.04	0.63	1.1	0.025	0.008	9.2	24.1	3.3	0.12	47	78.1	รอยเชื่อม



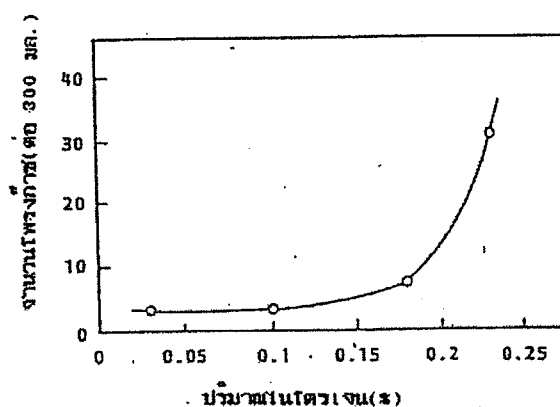
รูปที่ 2.42 ความเปราะของ SUS329 J2L  
โดยการเอียง (ใช้เวลา 15 นาที)



รูปที่ 2.43 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจน  
และความแข็งแรงพิสูจน์ 0.2% ของโลหะ  
ชิ้นงาน 18Cr-15Ni



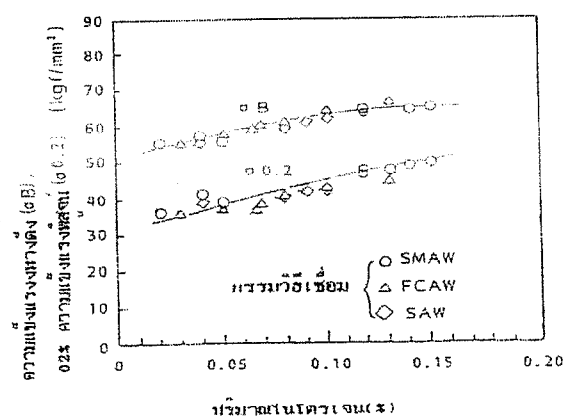
รูปที่ 2.44 ผลของปริมาณไนโตรเจนต่อความแข็งแรงการคืบแตกของโลหะชิ้นงานชนิด 316



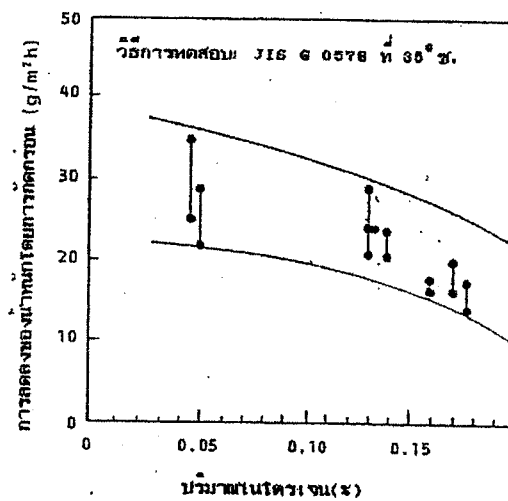
รูปที่ 2.45 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนและจำนวนโพรงก๊าซของโลหะรอยเชื่อม E308 (การเชื่อมอาร์คก๊าซคลุม, การเชื่อมในแนวเหนือศีรษะ)

ตารางที่ 2.12 ตัวอย่างส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของรอยเชื่อมต่อเหล็กกล้าไร้สนิมในโตรเจนสูง (โลหะขึ้นงาน = 304 LN)

กรรมวิธี การเชื่อม	ส่วนประกอบทางเคมีของรอยเชื่อม(ร. น้ำหนัก)								ปริมาณ เพื่อไว้ ในรอยเชื่อม (%)	ความแข็งแรงของ รอยเชื่อมต่อ	
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N		ความ แข็งแรง ทางดึง (กก. มม. <sup>2</sup> )	ตามแนว การแตก
SAW	0.03	0.41	2.1	0.025	0.003	9.8	20.1	0.12	4	70.2	รอยเชื่อม
FCAW	0.03	0.50	1.6	0.023	0.006	9.3	20.2	0.10	8	69.4	รอยเชื่อม
SAW	0.03	0.78	2.0	0.021	0.007	9.2	20.3	0.14	6	72.6	โลหะขึ้นงาน



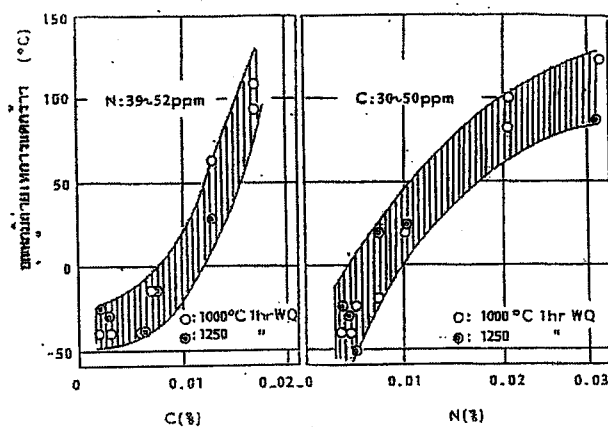
รูปที่ 2.46 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจน, ความแข็งแรงทางดึง และความแข็งแรงพิสูจน์ 0.2% ของโลหะรอยเชื่อมชนิด 308L



รูปที่ 2.47 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนของโลหะเชื่อม E308L และการลดลงของน้ำหนักโดยการทดสอบการกัดกร่อนเป็นหลุม

ตารางที่ 2.13 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรต์บริสุทธิ์สูง (ตาม JIS)

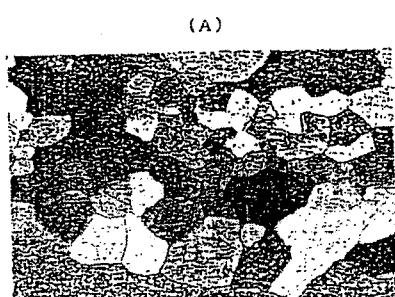
ชนิด	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมบริสุทธิ์สูง (น้ำหนัก)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	N	อื่น ๆ
SUS430LX	max. 0.030	max. 0.75	max. 1.00	max. 0.040	max. 0.030	16.00 - 19.00	---	---	Nb, or Ti 0.10 - 1.00
SUS436L	max. 0.025	max. 1.00	max. 1.00	max. 0.040	max. 0.030	16.00 - 19.00	0.75 - 1.25	max. 0.025	Ti or Nb or Zr หรือส่วนผสมของมัน $8x(C\%+N\%) \sim 0.80$
SUS444	max. 0.025	max. 1.00	max. 1.00	max. 0.040	max. 0.030	17.00 - 20.00	1.75 - 2.50	max. 0.025	Ti or Nb or Zr หรือส่วนผสมของมัน $8x(C\%+N\%) \sim 0.80$
SUS447J	max. 0.010	max. 0.40	max. 0.40	max. 0.030	max. 0.020	28.50 - 32.00	0.500 - 2.50	max. 0.025	---
SUSXM27	max. 0.010	max. 0.40	max. 0.40	max. 0.030	max. 0.020	25.00 - 27.50	0.75 - 1.50	max. 0.015	---



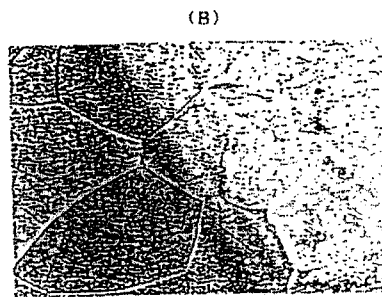
รูปที่ 2.48 ผลของปริมาณคาร์บอนและปริมาณไนโตรเจนต่อความเหนียวของเหล็กกล้าไร้สนิม  
เฟอร์ไรติกบริสุทธิ์สูง

ตารางที่ 2.14 สมบัติของโลหะรอยเชื่อม GTAW สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรติก

ส่วนผสมทางเคมีของวอยเชื่อม (%)									คุณสมบัติทางกลของโลหะรอยเชื่อม				พลังงาน ที่ดูดกลืน ที่ 0 °C.
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	N	0.2% ความ เค้นหยาบ กก./mm <sup>2</sup>	ความ แข็งแรง ทางดึง กก./mm <sup>2</sup>	ค่ายืด %	การ ลดลง %	
0.011	0.29	0.24	0.005	0.004	18.2	2.2	0.44	0.020	39.0	50.0	27	64	0.48

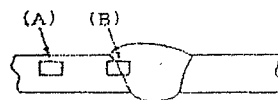


โลหะขั้วงาน (SUS444)



HAZ (เกรนหยาบ)

โลหะรอยเชื่อม (การเชื่อมมีคั่วด้วย  
เส้นลวดชนิด VG16L)



รูปถ่ายที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม SUS444 (X200)

ตารางที่ 2.15 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมที่การแข็งตัวตกตะกอน

ชนิด	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมที่การแข็งตัวตกตะกอน(น้ำหนัก)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	อื่น ๆ
SUS630	max. 0.07	max. 1.00	max. 1.00	max. 0.040	max. 0.030	3.00 - 5.00	15.50 - 17.50	3.00 - 5.00	Nb:0.15-0.45
SUS631	max. 0.09	max. 1.00	max. 1.00	max. 0.040	max. 0.030	6.50 - 7.75	16.00 - 18.00	---	Al:0.75-1.50

ตารางที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS630

หลังจากแปรเปลี่ยนการอบให้ความร้อน

คุณสมบัติต่าง ๆ	การอบ ละลายตัว (1040° ซ.)	อุณหภูมิการอบทางความร้อนสำหรับความแข็งแรงตกตะกอน หลังการอบละลายตัว(° ซ.)				
		480	495	550	580	620
ความแข็งแรงทางดึง (กก. แรง/มม <sup>2</sup> )	112.5	147.6	140.6	130.0	123.0	112.5
0.2% ความแข็งแรงทนดึง (กก. แรง/มม <sup>2</sup> )	101.9	140.6	137.1	119.5	116.0	105.4
ค่ายืด(%)	5.0	7.0	8.0	8.0	8.0	11.0
ความแข็ง(HRC)	33	45	43	38	37	33

ตารางที่ 2.17 สมบัติของโลหะรอยเชื่อมชนิด 630 สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม การแข็งตัวตกตะกอน

ส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อม(%)									คุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อม *				ความ แข็ง	พลังงาน ดูดกลืน
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb+Ta	Cu	0.2% ความ แข็งแรงทนดึง (กก. แรง/มม <sup>2</sup> )	ความแข็งแรงทางดึง (กก. แรง/มม <sup>2</sup> )	ค่ายืด (%)	การ ลดลง (%)	ความ แข็ง Hv	° ซ.
0.047	0.49	0.43	0.006	0.002	4.64	16.65	0.21	3.64	115.8	123.5	16	36	397	1.22

\* การให้ความร้อนหลังเชื่อม: 1050 ซ. x 30 นาที A.C + 470 ซ. x 4 ชม. A.C

### บทที่ 3

#### การเชื่อมเหล็กกล้าเจือต่ำต้านทานความร้อน

#### (Welding of Heat Resistant Low Alloy Steels)

##### 3.1 ชนิดและคุณลักษณะของเหล็กกล้าเจือต่ำต้านทานความร้อน

##### (Types and features of heat-resistant, low-alloy steels)

เหล็กกล้าเจือต่ำต้านทานความร้อนถูกใช้ทำเป็นเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับโรงงานพลังงาน ถ่านหิน , โรงงานพลังงานนิวเคลียร์ , โรงกลั่นน้ำมัน และโรงงานเคมีต่าง ๆ เนื่องจากมีคุณภาพที่ดีเลิศของความสามารถในการต้านทานความร้อนและการกัดกร่อน ตารางที่ 3.1 แสดงชนิดต่าง ๆ ของเหล็กกล้าเจือต่ำต้านทานความร้อนและรายละเอียดของส่วนผสมทางเคมีส่วนรูปที่ 3.1 เป็นการนำไปใช้งานของเหล็กกล้าเจือต่ำต้านทานความร้อน คุณสมบัติการใช้งานที่สูงขึ้นก็ต้องใช้เหล็กกล้าที่มีโลหะเจือสูงขึ้นด้วยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมการใช้งานนั้น

เหล็กกล้าเจือต่ำต้านทานความร้อนบางชนิดจะมีโครเมียมผสมอยู่ด้วย สำหรับทำให้สามารถต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน (oxidation) ได้ดี เมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และถ้ามีโมลิบดีนัมผสมอยู่ก็สามารถต้านทานการยืดตัวเมื่อได้รับความร้อน (creep) ได้ดีขึ้น เหล็กกล้าเจือต่ำต้านทานความร้อนบางชนิดก็มีนิกเกิลผสมอยู่เพื่อช่วยให้มีความเหนียวของรอยบากดีขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ

สำหรับอุปกรณ์ซึ่งถูกใช้ภายใต้แรงดันไฮโดรเจนเช่น เตาปฏิกรณ์ที่กำจัดซัลเฟอร์แรงดัน บางส่วนของไฮโดรเจนครอบคลุมการนำไปใช้งานของเหล็กกล้าเจือต่ำนอกเหนือจากอุณหภูมิการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ในรูปนี้เป็นเส้นโค้งเนลสัน (Nelson Curve) แนะนำค่าจำกัดของการนำไปใช้งานของเหล็กต่าง ๆ ที่อุณหภูมิสูงและแรงดันสูง อุณหภูมิและแรงดันเหนือค่าจำกัดของเหล็กกล้าจะเป็นสาเหตุให้ไฮโดรเจนแทรกตัวเข้ามาเส้นโค้งเนลสันจะแสดงค่าอุณหภูมิและแรงดันที่สูงขึ้นจำเป็นต้องมีธาตุเจือสูงขึ้นด้วยเพื่อต้านทานการแทรกตัวของไฮโดรเจน

นอกจากเหล็กกล้าธรรมดาที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ก็ยังมีเหล็กกล้าที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาอีกที่เรียกว่าเหล็กกล้าปรับสภาพ 2.25 % Cr-1 % Mo (Modified 2.25% Cr-1 % Mo) และเหล็กกล้าปรับสภาพ 3%Cr-1% Mo ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เหล็กกล้าปรับสภาพ 2.25% Cr-1 % Mo และเหล็กกล้าปรับสภาพ 3 % Cr-1 %Mo สามารถที่จะนำไปใช้ในสภาวะที่มีค่าความเค้นอนุญาต (allowable stresses) สูงกว่าเหล็กธรรมดา 2.25 % Cr-1 % Mo ตารางที่ 3.2 แสดงค่าที่จำเป็นของส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าปรับสภาพชนิดต่าง ๆ เหล็กกล้าปรับสภาพ



เหล่านี้จะมีความแข็งแรงสูงขึ้นและสามารถต้านทานการแทรกตัวของไฮโดรเจนได้อย่างมากที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเหล็กกล้าเหล่านี้ถูกใช้สำหรับถังแรงดันบำบัดน้ำเสียสำหรับเพิ่มคุณภาพน้ำมันและการผลิตเชื้อเพลิง

ตารางที่ 3.3 แสดงเหล็กกล้าชั้นสูงกลุ่มอื่น ๆ ที่ถูกพัฒนาให้มีความแข็งแรงสูงขึ้นที่อุณหภูมิสูง ๆ ซึ่งถูกนำมาใช้สำหรับหม้อไอน้ำ “Ultra-super Critical” เนื่องจากไอน้ำที่มีอุณหภูมิและแรงดันสูง รูปที่ 3.4 แสดงความเค้นอนุญาตของเหล็กกล้าชั้นสูงเหล่านี้ที่อุณหภูมิสูงภาพนี้จะแสดงเหล็กกล้าปรับสภาพ 9 % Cr-1 % Mo สามารถให้ความเค้นอนุญาตสูงสุดที่อุณหภูมิสูงถึง 600°C. และเหล็กกล้าชนิดนี้ถูกใช้เป็นส่วนหัวและท่อความร้อนของหม้อไอน้ำพลังงานถ่านหิน

### 3.2 โลหะวิทยาการเชื่อมและความสามารถในการเชื่อม

(Welding metallurgy and weldability)

เหล็กกล้าเจือดำต้านทานความร้อนนี้จะทำการเชื่อมได้ยาก เพราะว่ามีค่าความสามารถในการเชื่อม (weldability) น้อยมาก คือมีความสามารถในการเชื่อมอย่างง่ายมีโอกาสเกิดการแตกร้าวได้สูง และมีข้อเสียทางโลหะวิทยาอื่น ๆ ในหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึงปัญหาเหล่านี้และวิธีการป้องกัน

#### 3.2.1 ความสามารถในการแข็งตัวของรอยเชื่อม

(Hardenability of welds)

ธาตุเจือโครเมียมและโมลิบดีนัมสามารถทำให้เหล็กสามารถแข็งได้อย่างง่ายดายโดยการให้เย็นลงจากอุณหภูมิสูงด้วยอากาศเท่านั้น ความสามารถในการแข็งตัวนี้เรียกว่า “ความสามารถในการแข็งตัวด้วยตัวเอง (Self-hardenability)” ความสามารถในการแข็งตัวของเหล็ก 2.25 % Cr-1 % Mo และ 5 % Cr-0.5 % Mo สามารถดูได้จาก “เส้นโค้ง TTT” ซึ่งหมายถึงเส้นโค้งของเวลา-อุณหภูมิ-การเปลี่ยนโครงสร้าง ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 เส้นการเย็นตัวที่แสดงด้วย (1) และ (2) ในรูปทั้งสองนั้นหมายถึง ค่าการเย็นตัวต่ำสุดและสูงสุดที่เกิดขึ้นในการเชื่อม

รูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นว่าเหล็กกล้า 2.25 % Cr-1 % Mo เปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเตนไนติก (austenitic) ไปเป็นโครงสร้างผสมของ มาร์เทนไซต์ (martensitic) และเบนไนติก (bainitic) เกือบทั้งหมดในการเชื่อมส่วนเหล็กกล้า 5 % Cr-0.5 % Mo ในรูปที่ 3.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่จะได้เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์อย่างสมบูรณ์ทั้งหมด ซึ่งก็หมายความว่าเหล็กกล้า 5 % Cr-0.5 % Mo มีความสามารถในการแข็งตัวด้วยตัวเองสูงกว่า

รูปที่ 3.7 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการแข็งตัวของเหล็กกล้าชนิด Cr-Mo โดยวิธีการชุบแข็งที่ปลาย (End Quenching Method , JIS.G0561) โดยจะแสดงผลอย่างหยาบ ๆ ว่า ธาตุเจือโครเมียมที่สูงขึ้นสามารถทำให้ความสามารถในการแข็งตัวสูงขึ้นได้แนวโน้มเช่นนี้เป็นอย่างเดียวกับการเชื่อมโลหะที่เป็นโลหะขึ้นงาน โดยทั่ว ๆ ไปแล้วความแข็งที่สูงขึ้นเป็นผลทำให้ความอ่อน (ductility) ลดลงและความอ่อนที่ลดลงเป็นผลทำให้ความสามารถในการเกิดการแตกร้าวเพิ่มสูงขึ้น

### 3.2.2 การแตกร้าวเย็น (Cold cracking)

ปัญหาการแตกร้าวนี้จะพบได้หลังจากเกิดการแข็งตัวแล้วโดยที่การเชื่อมเหล็กกล้าเจือต่ำด้านทานความร้อน มีสาเหตุมาจากรอยเชื่อมมีสมบัติการอ่อนตัวที่ต่ำ เกิดความเค้นตกค้างในรอยเชื่อม และรอยเชื่อมมีไฮโดรเจนแทรกซึมอยู่ การแตกร้าวนี้รู้จักกันในหลาย ๆ ชื่อคือการแตกร้าวเย็น การแตกจากไฮโดรเจนเป็นตัวช่วย (hydrogen-assisted) การแตกจากไฮโดรเจนเป็นสื่อ (hydrogen-induced) และการแตกช่วงหลัง (delayed cracking) โดยทั่ว ๆ ไปการแตกร้าวจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C. ในทันทีหลังจากการเย็นตัวหรือหลังจากนั้นในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ช่วงเวลานี้ขึ้นอยู่กับชนิดของรอยเชื่อม ขนาดของความเค้นในการเชื่อมหรือความหนาของแผ่นขึ้นงาน และปริมาณไฮโดรเจนในรอยเชื่อมและบริเวณกระทบร้อน (heat-affected zone) ในกรณีต่าง ๆ นี้การแตกร้าวมีสาเหตุมาจากการที่ไฮโดรเจนสามารถแทรกซึมเข้าไปในรอยเชื่อมและบริเวณกระทบร้อน รูปที่ 3.8 แสดงผลจากการทดสอบของความไวในการแตกร้าวและความสามารถแพร่กระจายไฮโดรเจนในรอยเชื่อมเหล็กกล้า 2.25 % Cr-1 % Mo โดยการเชื่อมอาร์ค ฟลักซ์คลุม โดยจะแสดงให้เห็นว่าในที่ที่มีไฮโดรเจนแทรกซึมเข้าไปได้มากก็จะเกิดการแตกร้าวเย็นขึ้น

การแตกร้าวเย็นสามารถป้องกันได้โดยการใช้ 1. วัสดุงานเชื่อมลีนเปลือยชนิดไฮโดรเจนต่ำ 2. การผสมกันของการเชื่อมและการให้ความร้อนเพื่อทำให้ไฮโดรเจนแพร่ตัวหนีออกมา หรือ 3. การจัดลำดับขั้นตอนการเชื่อมที่เป็นผลทำให้ความเค้นจากการเชื่อมลดต่ำลง

การบำบัดหรือให้ความร้อนดังตัวอย่างในรูปที่ 3.9 แสดงผลการทดสอบการแตกร้าวใช้ร่องตัววาย (y-groove) ของรอยเชื่อมเหล็กกล้าชนิดต่างๆ รวมทั้ง เหล็กกล้าเจือต่ำด้านทานความร้อนในลักษณะของอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมจะช่วยป้องกันการแตกร้าวซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็ก โดยสรุปก็คือการเชื่อมเหล็กกล้าเจือต่ำด้านทานความร้อนต้องการอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนเชื่อมที่สูงด้วย ตารางที่ 3.4 แสดงส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของ

เหล็กกล้าที่ใช้ในการทดสอบนี้ รูปที่ 3.10 แสดงความหนาของแผ่นชิ้นงานที่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิในการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมที่สูงขึ้น

รูปที่ 3.11 แสดงผลของการให้ความร้อนในทันทีหลังการเชื่อม (Immediate heating after welding, IHAW) และการกระทำทางความร้อนหลังการเชื่อม (Postweld heat treatment, PWHT) ต่อการแตกร้าวของรอยเชื่อมเหล็กกล้า 2.25 % Cr-1 % Mo ซึ่งแสดงให้เห็นว่า IHAW มีส่วนช่วยลดในการแพร่กระจายของไฮโดรเจนและ PWHT ก็มีส่วนช่วยลดการแพร่กระจายของไฮโดรเจนอย่างรุนแรงนั่นก็คือการแตกร้าวนี้สามารถป้องกันไว้ได้

### 3.2.3 การแตกร้าวร้อน (hot cracking)

ปัญหาการแตกร้าวนี้จะพบได้ในช่วงที่เกิดการแข็งตัว โดยที่การเชื่อมเหล็กกล้าเจือดำ ด้านทานความร้อนมีสาเหตุมาจากส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อม รูปร่างของรอยเชื่อม และความเค้นจากการเชื่อมในรอยเชื่อม การแตกร้าวนี้รู้จักกันในหลายชื่อ เช่น การแตกร้าวระหว่างการแข็งตัว การแตกร้าวที่อุณหภูมิสูง และการแตกร้าวร้อน การแตกร้าวร้อนนี้ถูกอ้างอิงเป็นเช่นการแตกร้าวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เช่นช่วงระหว่างของเหลวเปลี่ยนเป็นของแข็ง (Liquidus-to-solidus) หรือต่ำกว่าเส้นแข็งตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพียงเล็กน้อย การแตกร้าวร้อนจะเกิดขึ้นตามขอบเกรน (grain boundaries) ของรอยเชื่อม

การแตกกั้วร้อนสามารถป้องกันได้โดยการควบคุม

1. ธาตุเจือปนคือ ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส
2. รูปร่างของรอยเชื่อม
3. ความร้อนเข้า (heat input)

รูปที่ 3.12 แสดงผลของรูปร่างตะเข็บรอยเชื่อมต่อความไวในการแตกร้าวร้อนของรอยเชื่อม ซึ่งแนะนำว่าอัตราส่วน W/H ควรจะมากกว่า 1.0 เพื่อที่จะป้องกันการแตกร้าวร้อน รูปที่ 3.13 แสดงผลของความร้อนเข้าต่อความไวในการแตกร้าวของรอยเชื่อมซึ่งแนะนำความร้อนเข้าควรจะใช้ต่ำ ๆ เพื่อที่จะป้องกันการแตกร้าวร้อน รูปถ่ายที่ 3.1 แสดงโครงสร้างมหภาคที่มีการแตกร้าวร้อนเกิดขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อม

### 3.2.4 การแตกร้าวเมื่อให้ความร้อนซ้ำ (SR-cracking)

ปัญหาการแตกร้าวนี้จะพบได้เมื่อทำการให้ความร้อนซ้ำกับรอยเชื่อมเหล็กกล้าเจือดำ ด้านทานความร้อน ซึ่งรู้จักกันในชื่อ การแตกร้าว SR หรือการแตกร้าวเมื่อให้ความร้อนซ้ำ

เนื่องจากการแตกร้าวนี้อาจเกิดขึ้นได้เมื่อรอยเชื่อมถูกให้ความร้อนหลังการเชื่อมสำหรับการขจัดความเค้น (Stress relief) และการใช้งานในที่อุณหภูมิสูง

การแตกร้าวนี้อาจจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของความเค้นตกค้าง อุณหภูมิที่ให้ความร้อนช้า และส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อม รอยแตกร้าวนี้อาจจะเกิดขึ้นที่ขอบเกรนหยาบของบริเวณกระทบร้อนของโลหะขึ้นงาน รูปที่ 3.14 แสดงอุณหภูมิของความไวในการแตกร้า SR ของเหล็กกล้า ซึ่งแสดงไว้ให้เห็นว่าที่อุณหภูมิประมาณ 600°C. จะมีความไวต่อการแตกร้านี้สูงสุด เพราะว่าเกิดการแข็งตัวอย่างเร็ว

### 3.2.5 ผลของการกระทำทางความร้อนหลังการเชื่อม

(Effects of postweld heat treatment)

การกระทำทางความร้อนหลังการเชื่อมจะรวมถึงการอบชุบชนิดต่าง ๆ ที่ได้กระทำหลังจากการเชื่อมผ่านพ้นไปแล้ว เช่น การอบเพื่อขจัดความเค้น (stress-relief-annealing) การนอร์มัลไลซ์ (normalizing) และการชุบแข็ง (quenching) อย่างไรก็ตามในบทนี้จะกล่าวถึงการอบเพื่อขจัดความเค้นเท่านั้น โดยทั่ว ๆ ไปการกระทำทางความร้อนหลังการเชื่อมจะถูกเรียกว่า PWHT

รอยเชื่อมเหล็กกล้าเจือดำด้านทานความร้อน ยกเว้นชิ้นงานที่เป็นแผ่นบาง ๆ มักจะต้องทำการ PWHT เสมอ ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะ

1. ลดความเค้นจากการเชื่อมที่ตกค้างอยู่
2. กำจัดไฮโดรเจนที่แทรกซึมอยู่ภายใน
3. เพิ่มสมบัติการอ่อนตัวและความเหนียวรอยบาก
4. ทำให้ความแข็งแรงในการยึดตัว (creep strength) ดีขึ้น
5. เพิ่มความสามารถในการต้านทานการแทรกตัวของไฮโดรเจน

รูปที่ 3.15 แสดงผลของการทำ PWHT กับ การลดความเค้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ลดความเค้นตกค้างได้มาก

รูปที่ 3.16 แสดงความแข็งแรงเป็นฟังก์ชันของเนื้อโลหะรอยเชื่อมกับบริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้า 2.25 % Cr-1 % Mo ในรูปของพารามิเตอร์การอบคืนตัว (temper) ของ PWHT :

$$P = T (\log t + 20) \times 10^{-3}$$

ในเมื่อ  $T$  = อุณหภูมิให้ความร้อน (K, เคลวิน)

$t$  = ช่วงเวลาการให้ความร้อน (ชม.)

ในรูปนี้แสดงให้เห็นว่า PWHT จะทำให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดลงหรืออีกนัยหนึ่ง PWHT จะทำให้สมบัติการอ่อนตัวของรอยเชื่อมดีขึ้น

รูปที่ 3.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลของเนื้อโลหะรอยเชื่อม 1.25 % Cr-0.5 % Mo รูปนี้จะแสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่าพื้นที่การยึดตัวและการหดตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อพารามิเตอร์ของการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงพิสูจน์ 0.2% และความแข็งแรงทางดึงก็จะลดลง

รูปที่ 3.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการกระแทกชาร์ปีของเนื้อโลหะรอยเชื่อม 1.25 % Cr-0.5 % Mo กับพารามิเตอร์ของการอบคืนตัว รูปนี้จะแสดงให้เห็นว่าพลังงานการกระแทกนี้จะดีขึ้นเมื่อพารามิเตอร์การอบคืนตัวเพิ่มสูงขึ้นจนถึงพิสัยที่แน่นอนจุดหนึ่ง อย่างไรก็ตามการให้ PWHT มากเกินไปก็ทำให้พลังงานการกระแทกลดต่ำลงเพราะว่าการตกตะกอนของเฟอไรต์เกรนหยาบ

รูปที่ 3.19 แสดงอุณหภูมิ PWHT มีผลต่อความแข็งแรงในการคืบแตก (Creep rupture strength) ของเนื้อโลหะรอยเชื่อม 2.25 % Cr-1 % Mo รูปนี้จะชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิ PWHT 720 °ซ. จะทำให้มีความแข็งแรงในการยึดตัวสูงขึ้นสำหรับการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

อุณหภูมิ PWHT ที่สูงเกินไปจะเป็นสาเหตุให้เกิดผลตรงกันข้ามของ “แถบเฟอไรต์ (Ferrite band)” แถบเฟอไรต์เป็นเฟสชนิดหนึ่งของการลดคาร์บอนที่ตกตะกอนไปตามแนวยาวของการหลอมละลาย (fusion line) ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ในขณะที่อยู่ในอุณหภูมิสูง ๆ รูปถ่ายที่ 3.2 แสดงตัวอย่างแถบเฟอไรต์ที่ตกตะกอนในโลหะรอยเชื่อม 2.25 % Cr-1 % Mo

อุณหภูมิที่ซึ่งแถบเฟอไรต์ตกตะกอนจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของโลหะรอยเชื่อม ในที่ซึ่งแถบเฟอไรต์ตกตะกอนจะทำให้ความแข็งแรงทางดึง และพลังงานการกระแทกของโลหะรอยเชื่อมลดลงอย่างมาก รูปที่ 3.20 แสดงอุณหภูมิและเวลาที่ทำให้แถบเฟอไรต์ตกตะกอนของโลหะรอยเชื่อม 2.25 % Cr-1 % Mo

### 3.2.6 การแตกเปราะในการอบคืนตัว (Temper embrittlement)

การแตกเปราะในการอบคืนตัวเป็นปรากฏการณ์ที่ความเหนียวรอยบากของเหล็กกล้าบางชนิดได้ลดลงเมื่อเหล็กกล้านั้นถูกอบคืนตัวหรือเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิระหว่าง 375–575 °ซ. เหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ ที่รวมถึงเหล็กกล้า 2.25 % Cr-1 % Mo และเหล็กกล้า 3 % Cr-1 % Mo ซึ่งถูกใช้สำหรับถังปฏิกรณ์รับแรงดันสำหรับการกลั่นน้ำมันซึ่งใช้งานในที่อุณหภูมิและแรงดันสูง อุณหภูมิการใช้งานของถังรับแรงดันนี้จะตกอยู่ในช่วง 400 – 480 °ซ. ดังนั้นถังรับแรงดันนี้จึงสามารถเกิดการแตกเปราะในการอบคืนตัว เพราะว่ามีการใช้งานต่อเนื่องกันเป็นระยะเวลาที่ยาวนานดังนั้นถ้าความเหนียวรอยบากของถังรับแรงดันลดลง ปัญหาการแตกร้าวก็สามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงการหยุดทำงาน (Shut-down operation) ช่วงการเริ่มต้นทำงาน (start-up operation) และช่วงการทดสอบไฮโดรลิก

การแตกเปราะในการอบคืนตัวส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบเกรนอสเตนไนติกแรกเริ่มซึ่งจะพูดได้ว่าเกิดขึ้นเพราะธาตุแปลกปลอมเช่น ฟอสฟอรัส อังติโมนี คีนิก และอะเซนิก แทรกซึมเข้าไปในส่วนต่าง ๆ ของธาตุเจือคาร์บอน มังกานีส ซิลิกอน นิเกิล โครเมียม และโมลิบดีนัม ซึ่งเป็นตัวเร่งให้เกิดการแตกเปราะนี้ขึ้นมีสูตรที่เกี่ยวข้องกับธาตุทางเคมีเหล่านี้หลายสูตรที่ถูกแนะนำในการใช้ควบคุมการแตกเปราะในการอบคืนตัว ซึ่งสูตรต่อไปนี้จะถูกระบุสำหรับงานประกอบเช่นถังรับแรงดั่งที่ได้กล่าวถึงมาแล้วข้างต้น

$$X = (10P + 5 Sb + 4 Sn + As) \times 10^{-2}$$

$$J = (Mn + si) \times (P + Sn) \times 10^4$$

ในเมื่อธาตุเคมีต่าง ๆ นี้คิดเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก

การแตกเปราะในการอบคืนตัวมักจะเกิดขึ้นเมื่อเหล็กกล้า 2.25 % Cr-1 % Mo และ 3 % Cr-1 % Mo ถูกนำมาใช้ เพราะว่าเหล็กกล้าพวกนี้มีความไวอย่างมากต่อการเกิดการแตกเปราะชนิดนี้ รูปที่ 3.21 แสดงการเปรียบเทียบความไวในการแตกเปราะในการอบคืนตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมชนิดต่าง ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโลหะรอยเชื่อม 2.25 % Cr-1 % Mo ก่อนและหลังการกระทำทางความร้อนแบบเย็นตัวเป็นขั้น (Step cooling) รูปที่ 3.23 แสดงการกระทำทางความร้อนแบบเย็นตัวเป็นขั้นสำหรับการทดสอบการแตกเปราะในการอบคืนตัวที่นำมาใช้สำหรับรูปที่ 3.22

### 3.2.7 การต่อโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar metal joint)

เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับโรงพลังงาน โรงกลั่น และโรงงานเคมีจะถูกก่อสร้างด้วยโลหะชนิดต่าง ๆ โดยขึ้นอยู่กับ การแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิ แรงดัน และสภาวะแวดล้อมในการกักเก็บ ซึ่งจะเกิดขึ้นในระหว่างการทำงาน ดังนั้นการต่อโลหะที่ต่างชนิดกันจึงขาดเสียไม่ได้ บทต่อไปนี้จะกล่าวถึงปัญหาทางโลหะวิทยาในการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดกันของ 1. เหล็กกล้าเฟอร์ไรติกกับเหล็กกล้าเฟอร์ไรติกและ 2. เหล็กกล้าเฟอร์ไรติกกับเหล็กกล้าอสเตนไนติก

#### 1. เหล็กกล้าเฟอร์ไรติกกับเหล็กกล้าเฟอร์ไรติก

(Ferritic steel-to — ferritic steel)

การเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดกันดังตัวอย่างเช่นเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) และเหล็กกล้า 2.25 % Cr-1 % Mo สามารถทำการเชื่อมได้โดยใช้อิเล็กโทรดหรือลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอน ลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้า 1.25 % Cr-0.5 % Mo หรือลวดเชื่อมเหล็กกล้า 2.25 % Cr-1 % Mo

การให้ความร้อนก่อนเชื่อมด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสมควรจะทำเช่นเดียวกับเหล็กกล้าที่มีธาตุเจือสูงกว่าเพื่อทำให้เหล็กกล้าที่มีธาตุเจือสูงกว่านี้มีสมบัติความสามารถในการเชื่อม

(weldability) ดีขึ้นเช่นเดียวกับการให้ความร้อนหลังการเชื่อมก็ควรกระทำเช่นเดียวกับเหล็กกล้าที่มีธาตุสูงกว่าที่อุณหภูมินั้นไม่ไปทำความเสียหายให้เกิดขึ้นกับเหล็กกล้าที่มีธาตุเจือต่ำกว่า

การกระทำทางความร้อนหลังการเชื่อม (PWHT) สามารถเป็นเหตุให้เกิดความไม่ต่อเนื่องทางโลหะวิทยาของการเคลื่อนย้ายคาร์บอนในส่วนที่มีการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดกันในการเคลื่อนย้ายคาร์บอนตัวอย่างเช่น คาร์บอนที่มีอยู่ในโลหะรอยเชื่อมที่มีโครเมียมต่ำกว่าสามารถที่จะแทรกซึมเข้าไปในโลหะรอยเชื่อมที่มีโครเมียมสูงกว่าโดยผ่านเส้นหลอมละลายเข้าไปตกตะกอนในโลหะรอยเชื่อมที่มีโครเมียมต่ำกว่าก็จะเป็นบริเวณลดคาร์บอน (decarburized) และโลหะรอยเชื่อมที่มีโครเมียมสูงกว่าก็จะเป็นบริเวณเพิ่มคาร์บอน (carburized) เพราะว่าการมีความสัมพันธ์กันอย่างมากระหว่างโครเมียมและคาร์บอน รูปที่ 3.24 และรูปถ่ายที่ 3.3 แสดงผลการทดสอบของการเคลื่อนย้ายคาร์บอนที่เกิดขึ้นในบริเวณการหลอมละลาย ระหว่างโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้า 1.25 % Cr-0.5 % Mo กับเหล็กกล้า 5 % Cr-0.5 % Mo ในกรณีนี้บริเวณเพิ่มคาร์บอนจะตกตะกอนในโลหะรอยเชื่อมที่มีโครเมียมสูงกว่าใกล้ ๆ กับเส้นหลอมละลาย ส่วนในบริเวณลดคาร์บอนจะตกตะกอนในโลหะรอยเชื่อมที่มีโครเมียมต่ำกว่าใกล้ ๆ กับเส้นหลอมละลายดังนั้นความไม่ต่อเนื่องของความแข็งก็จะเกิดขึ้นผ่านบริเวณการหลอมละลาย

การเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนย้ายคาร์บอนขึ้นอยู่กับ 1. ความแตกต่างในการเข้ามารวมกันของธาตุเจือต่าง ๆ ซึ่งมีความสัมพันธ์อย่างสูงกับธาตุคาร์บอนระหว่างธาตุเจือที่ต่ำกว่ากับธาตุเจือที่สูงกว่าในการเชื่อมต่อ และ 2. อุณหภูมิและเวลาของการกระทำทางความร้อนหลังการเชื่อม โดยการคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ การใช้ขั้นตอนการเชื่อมที่ถูกต้อง ควรจะนำมาใช้เพื่อที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายคาร์บอนน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามจะกล่าวได้ว่าการเคลื่อนย้ายคาร์บอนด้วยตัวเองไม่ได้เป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาอย่างร้ายแรงในสมบัติทางกล ถ้าหากว่าการเคลื่อนย้ายคาร์บอนไม่ได้เกิดเพิ่มขึ้นมากเกินไป

## 2. เหล็กกล้าเฟอร์ไรติกกับเหล็กกล้าออสเทนไนติก

(Ferritic steel-to-austenitic steel)

การเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดดังตัวอย่างระหว่างเหล็กกล้า 2.25 % Cr-1 % Mo กับเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 (304 type stainless steel) สามารถที่จะทำการเชื่อมได้ด้วยลวดเชื่อมทั้งชนิด 309 และลวดเชื่อมชนิดนิเกิล - โครเมียม- เฟอร์รัส

การให้ความร้อนก่อนเชื่อมควรใช้อุณหภูมิเช่นเดียวกับที่ใช้กับเหล็กกล้าเฟอร์ไรติก และไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนก่อนเชื่อมกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติก ในที่นี้ความจำเป็นต้องการกระทำทางความร้อนหลังการเชื่อม รวมทั้งรอยเชื่อมที่ต้องถูกใช้งานในอุณหภูมิสูง นั้นควร

จะใช้ลวดเชื่อมชนิดนิเกิล-โครเมียม-เฟอร์รัส ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะทำให้เกิดปัญหาน้อยที่สุดเกี่ยวกับการบวมและการล้าแตกเนื่องจากความร้อนในระหว่างการใช้งาน

### 3.3 กรรมวิธีในการเชื่อมและวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลือง

#### (Welding processes and welding consumables)

ในการเชื่อมเหล็กกล้าเชื้อดำด้านทานความร้อนนี้ก็มีกรรมวิธีในการเชื่อมที่ถูกใช้อยู่หลายวิธี ได้แก่ การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค (Shielded metal arc welding : SMAW) การเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุม (Submerged arc welding : SAW) การเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุม (Gas metal arc welding : GMAW) และการเชื่อมอาร์คทังสเตนก๊าซคลุมหรือการเชื่อมทิก (Gas tungsten arc welding : GTAW)

กรรมวิธีการเชื่อมแต่ละวิธีนี้จะใช้วัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองตามที่ถูกระบุไว้และในบทต่อไปนี้จะกล่าวถึงกรรมวิธีต่าง ๆ ในการเชื่อมและวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองที่ใช้ในการเชื่อมด้วย

#### 3.3.1 กรรมวิธีในการเชื่อมและการนำไปใช้งาน

##### (Welding processes and applications)

##### 1. การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค

##### (Shielded metal arc welding : SMAW)

SMAW ใช้ขี้เหล็กโทรดหุ้มฟลักซ์และสามารถนำไปใช้ได้กับการเชื่อมเกือบทั้งหมดของงานใช้งานในแนวหรือทำเชื่อมต่าง ๆ อย่างไรก็ตามคุณภาพของรอยเชื่อมจะดีมากน้อยแค่ไหนก็ขึ้นอยู่กับความชำนาญของช่างเชื่อมมากกว่าในกรรมวิธีการเชื่อมแบบอื่น ๆ ดังนั้นการทดสอบให้ได้คุณภาพของความชำนาญของช่างเชื่อมควรจะต้องกระทำอย่างเข้มงวด กรรมวิธีการเชื่อมนี้ใช้ได้ทั้งกระแสไฟสลับ (AC) และกระแสไฟตรงอิเล็กโทรดขั้วบวก (DC-EP)

##### 2. การเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุม

##### (Submerged arc welding : SAW)

การเชื่อม SAW ใช้ฟลักซ์และเส้นลวดเชื่อมตันร่วมกันในการเชื่อมและสามารถให้การเชื่อมที่มีประสิทธิภาพสูง ทั้งนี้ก็เนื่องจากมีอัตราการเติมเนื้อโลหะที่สูงและกรรมวิธีที่ใช้เครื่องจักรช่วยทำ การเชื่อม SAW ถูกใช้สำหรับการเชื่อมรอยต่อตะเข็บและรอยต่อสายคาดสำหรับการประกอบถังรับแรงดันที่มีความหนาแน่นมาก ๆ ในแนวราบ (flat position) กรรมวิธีการเชื่อมนี้ใช้ได้ทั้งกระแสไฟสลับ และกระแสไฟตรงอิเล็กโทรดขั้วบวก



### 3. การเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุม

(Gas metal arc welding : GMAW)

ในการเชื่อม GMAW ด้วยเส้นลวดเชื่อมตันโดยทั่ว ๆ ไปจะใช้ก๊าซคลุมคือก๊าซ  $\text{CO}_2$  บริสุทธิ์และก๊าซผสมระหว่าง  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  (ตัวอย่างเช่น 80%  $\text{Ar} + 20\% \text{CO}_2$ ) การถ่ายโอนแบบของเม็ดโลหะเชื่อม (mode of droplets) จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมของก๊าซคลุมกระแสไฟเชื่อม และแรงดันไฟฟ้าในการอาร์ค และการถ่ายโอนแบบของเม็ดโลหะก็จะเป็นการบ่งบอกความสามารถในการนำไปใช้งานในการเชื่อมแนวต่าง ๆ

การถ่ายโอนแบบเป็นเม็ด (globular transfer mode) ด้วยก๊าซ  $\text{CO}_2$  บริสุทธิ์และกระแสไฟสูง ถูกใช้สำหรับการเชื่อมในแนวราบ (flat - position) การถ่ายโอนแบบเป็นละออง (spray transfer mode) ด้วยก๊าซผสม  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  และกระแสไฟสูงถูกใช้สำหรับการเชื่อมในแนวราบที่ต้องการคุณภาพดีมากกว่าการเชื่อมที่ใช้ก๊าซ  $\text{CO}_2$  บริสุทธิ์ ส่วนการถ่ายโอนแบบลัดวงจร (shortcircuiting transfer mode) ด้วยก๊าซผสม  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  และกระแสไฟต่ำ ถูกใช้สำหรับการเชื่อม นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้ว การถ่ายโอนแบบเป็นละอองด้วยก๊าซผสม  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  และกระแสไฟพัลส์ (Pulsed amperage) ถูกใช้ได้สำหรับการเชื่อมในทุก ๆ แนวการเชื่อม

การเชื่อม GMAW สามารถใช้การเคลื่อนที่แบบกึ่งอัตโนมัติ โดยที่การเคลื่อนไหวของหัวเชื่อม (torch) นั้นใช้คนควบคุมการเคลื่อนไหว และการทำงานส่วนอื่น ๆ เป็นไปโดยอัตโนมัติโดยกรรมวิธีของเครื่องจักรกล การเชื่อมแบบนี้ใช้กระแสดรงอิเล็ค โตรดชั่ววอก (DC-EP)

#### 3.3.2 ชนิดและคุณลักษณะของวัสดุงานเชื่อมลึนเปลือง

(Types and features of welding consumables)

##### 3.3.2.1 อิเล็ค โตรดหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค (SMAW)

ตารางที่ 3.5 แสดงรายการมาตรฐานอิเล็ค โตรดหุ้มฟลักซ์สำหรับเหล็กกล้าเชื่อมต่ำ ด้านทานความร้อนที่กำหนดโดย JIS Z3223 แม้ว่าได้มีการกำหนดสารพอกหุ้มไว้หลายชนิด แต่สารพอกหุ้มหรือฟลักซ์ชนิดไฮโดรเจนต่ำก็เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด เพราะว่ามีความสามารถด้านการแตกร้าวดีดีกว่า สำหรับชนิดผงเหล็กไฮโดรเจนต่ำจะมีผงเหล็กผสมอยู่ในสารพอกหุ้มด้วยเพื่อช่วยทำให้อัตราการเติมน้ำโลหะมากขึ้น ส่วนชนิดใดคาเนียมออกไซด์สูงก็จะมีผลดีต่อการเชื่อมท่อบาง ๆ เนื่องจากมีการซึมลึกที่ดีขึ้น และใช้สำหรับการตกแต่งผิวหน้างานเชื่อม เนื่องจากผิวหน้าตะเข็บเชื่อมจะเรียบ

อิเล็กโทรดชนิด DT 3215 และ DT 2415 ซึ่งใช้ได้เฉพาะกับกระแสไฟตรง อิเล็กโทรดขั้วบวกเท่านั้น ก็จะใช้ได้ผลดีกับการให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อมด้วยอุณหภูมิที่ต่ำ ๆ

สำหรับในมาตรฐานของสหรัฐอเมริกาจะอ้างถึง AWS A5.5 , “Specification for Low Alloy Steel Covered Arc Welding Electrodes” และ A5.4 , “Specification for Covered Corrosion-Resisting Chromium and Chromium – Nickel Steel Welding Electrodes”

### 3.3.2.2 เส้นลวดเชื่อมและฟลักซ์สำหรับการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุม (SAW)

การเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุมจะการใช้การปฏิบัติงานร่วมกันของเส้นลวดเชื่อมและฟลักซ์ ดังนั้นมาตรฐานต่าง ๆ จึงระบุไว้ทั้งเส้นลวดเชื่อมและฟลักซ์ดังเช่นมาตรฐานที่กำหนดโดย JIS Z3351 “Submerged Arc Welding Wires for Carbon Steel and Low Alloy Steel” และ Z 3352 “Submerged Arc Welding Fluxes for Carbon Steel and Low Alloy Steel.” ในมาตรฐานของญี่ปุ่น ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลที่จำเป็นสำหรับเนื้อโลหะเดิมหรือรอยเชื่อมจะเกิดจากการผสมผสานกันของเส้นลวดเชื่อมและฟลักซ์ซึ่งถูกระบุอยู่ใน JIS Z3183, “Quality Classification and Test Methods of Submerged Arc Deposited Metal for Carbon and Low Alloy Steel” ตารางที่ 3.6 ตารางที่ 3.7 และตารางที่ 3.8 แสดงประเภทต่าง ๆ ของเส้นลวดเชื่อม ฟลักซ์ และเนื้อโลหะเดิมตามลำดับ

สำหรับในมาตรฐานของสหรัฐอเมริกาจะอ้างอิงถึง AWS A5.23 “Specifications for Low Alloy Steel Electrodes and Fluxes for Submerged Arc Welding” รูปที่ 3.25 แสดงระบบการแบ่งประเภทต่าง ๆ ของ A5.23

### 3.3.2.3 เส้นลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุม (GMAW)

ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของโลหะรอยเชื่อมจะขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซที่ใช้คลุมการอาร์ค ดังนั้นมาตรฐานนี้จะระบุถึงก๊าซคลุมด้วยดังที่ให้ไว้ในตารางที่ 3.9 ; JIS Z3317 “MAG Welding Solid Wires for Molybdenum Steel and Chromium Molybdenum Steel” สำหรับในมาตรฐานของสหรัฐอเมริกาจะอ้างอิงถึง AWS A5.28 , “Specification for Low Alloy Steel Filler Metals for Gas Shielded Arc Welding” รูปที่ 3.26 แสดงผลของการผสมก๊าซคลุมต่อค่าพลังงานการกระแทกชาร์ปีของโลหะรอยเชื่อม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า  $\text{CO}_2$  ที่มีเปอร์เซ็นต์สูงกว่าจะทำให้ได้พลังงานการกระแทกที่ต่ำกว่า ดังนั้นการเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุมจึงควรใช้ก๊าซคลุมที่มีส่วนผสมตามที่ถูกระบุหรือกำหนดโดยโรงงานผู้ผลิตเส้นลวดเชื่อม

### 3.3.2.4 เส้นลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนก๊าซคลุม (GTAW)

ตารางที่ 3.10 แสดงเส้นลวดเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าเชื่อมด้วยไฟฟ้าด้านทานความร้อนที่ระบุโดย JIS Z3316 , “Mild Steel and Low Alloy Steel Filler Rods and Wires for TIG Arc Welding” ในการเชื่อมทิกหรือ GTAW จะใช้ก๊าซคลุมเป็นก๊าซเฉื่อยเช่นอาร์กอนหรือฮีเลียม

ดังนั้นส่วนผสมทางเคมีของโลหะรอยเชื่อมจึงเกือบเหมือนกับส่วนผสมทางเคมีของเส้นลวดเชื่อมที่ใช้ เส้นลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อม GTAW นี้จะถูกทำให้อยู่ในรูปแบบตัดเป็นแท่ง ๆ (rods) และเป็นเส้นพันอยู่รอบหลอด

### 3.3.2.5 วัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองขั้นสูง (Advanced welding consumables)

นอกจากวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองชนิดต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ก็ยังมีวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองขั้นสูงอีกสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าปรับสภาพ 2.25 %Cr – 1% Mo, และเหล็กกล้าปรับสภาพ 9 %Cr – 2% Mo ตารางที่ 3.11 และตารางที่ 3.12 แสดงส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองเหล่านี้สำหรับการใช้งานขั้นสูงตามที่ระบุไว้

### 3.3.3 แนวทางการเลือกวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลือง

สำหรับการเลือกวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองให้ถูกต้องนั้น ควรที่จะคำนึงถึงสิ่งต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ธาตุเจือเหล็กเช่นโครเมียมและโมลิบดีนัมสามารถถูกใส่เติมลงไปโลหะรอยเชื่อมในปริมาณเปอร์เซ็นต์ที่เกือบเท่ากับโลหะชิ้นงานที่ใช้
2. สมบัติทางกลของโลหะรอยเชื่อมสามารถมีพอเพียงตามความต้องการในการออกแบบรอยต่องานเชื่อมหลังจากการทำ PWHT

นอกจากนี้ก็ยังมีความสามารถในการใช้เชื่อมแนวต่าง ๆ อุปกรณ์ในการเชื่อมที่มีอยู่และค่าใช้จ่ายในการเชื่อมที่ยอมรับได้

ตารางที่ 3.13 และตารางที่ 3.14 แสดงแนวทางการเลือกอย่างรวดเร็วสำหรับวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองที่ถูกต้อง รวมทั้งสำหรับรอยต่อโลหะที่ไม่เหมือนกันด้วย

## 3.4 ข้อควรจำทั่วไปของลำดับขั้นตอนการเชื่อม

(General notes on welding procedures)

### 3.4.1 การเตรียมร่องงานเชื่อม

(Preparation of welding grooves)

ร่องงานเชื่อมควรจะกว้างพอเพียงที่จะทำให้มีการเชื่อมได้ง่ายโดยไม่เกิดสิ่งบกพร่องและในขณะเดียวกันก็แคบพอเพียงที่จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการเชื่อมน้อยที่สุด ร่องงานเชื่อมสำหรับการ

เชื่อมต่อน (butt welding) มักจะแปรเปลี่ยนตามรูปร่างของร่องงานเชื่อมจากสี่เหลี่ยม ร่องตัววี เดี่ยว ร่องตัววีคู่ ร่องตัวยูเดี่ยว ร่องตัวยูคู่ โดยเป็นไปตามความหนาเพิ่มขึ้นของแผ่นชิ้นงาน รูปที่ 3.27 แสดงตัวอย่างของร่องงานเชื่อมสำหรับการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุมของเหล็กกล้า 2.25 %Cr – 1% Mo

ร่องงานเชื่อมจะต้องปราศจากสะเก็ด สนิม คราบน้ำมัน ความชื้นและสิ่งสกปรก เพราะว่า สิ่งเหล่านี้สามารถเป็นสาเหตุให้เกิดรูพรุน การฝังในและรอยแตก

### 3.4.2 การอบแห้งซ้ำก่อนนำวัสดุงานเชื่อมไปใช้งาน

#### (Redrying welding consumables before use)

วัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองทั้งหมดควรจะเก็บไว้ในที่ที่มีอากาศถ่ายเทได้ดีเพื่อที่จะป้องกัน ไม่ให้เกิดการดูดซับความชื้น นอกจากนี้อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมแบบปกคลุมการ อาร์คและฟลักซ์สำหรับการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุมควรจะมีการอบแห้งซ้ำอีกครั้งหนึ่งก่อนที่จะ นำไปใช้งานเพื่อที่จะทำให้ไฮโดรเจนแทรกซึมเข้าไปในโลหะรอยเชื่อมน้อยที่สุด และเพื่อที่จะ รักษาความสามารถในการทำงาน (workability) ของวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองให้ดีที่สุด

อุณหภูมิและเวลาในการอบแห้งซ้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์และฟลักซ์ ควรที่จะใช้ตามที่โรงงานผู้ผลิตวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองได้ระบุหรือกำหนดมาให้

### 3.4.3 ก๊าซที่ใช้ปกคลุมและอัตราการไหลของก๊าซ

#### (Gas shielding and gas flow rate)

สำหรับการใช้ก๊าซคลุมที่ถูกต้อง อัตราการไหลของก๊าซคลุม ระยะห่างของหัวฉีดก๊าซ และผลของลมที่พัดผ่านต้องนำมาพิจารณาด้วย ตารางที่ 3.15 แสดงข้อแนะนำเหล่านี้ เมื่อกระแส ลมพัดด้วยความเร็วมากกว่าที่กำหนดก็ควรตั้งระยะห่างของหัวฉีดก๊าซให้สั้นลง อัตราไหลของ ก๊าซคลุมก็ควรเพิ่มขึ้น หรือให้ฉากกั้นลมของหัวฉีดก๊าซให้สั้นลง

### 3.4.4 ความสูงของแนวฟลักซ์

#### (Flux burden height)

ในการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุม ความสูงของแนวฟลักซ์ที่คลุมการเชื่อมนั้นมีมากเกินไปก็ สามารถเป็นสาเหตุให้เกิดตะเข็บรอยเชื่อมที่ไม่เรียบสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามความสูงของแนว ฟลักซ์ที่น้อยเกินไปก็จะทำให้เกิดรูพรุนขึ้นได้ เพราะว่าการอาร์คที่คลุมไม่มิดนั้นจะสามารถทำให้ ไฮโดรเจนและออกซิเจนในอากาศเข้ามาในบ่อหลอมเหลว

ความสูงของแนวฟลักซ์ที่ถูกต้องขึ้นอยู่กับชนิดของฟลักซ์ ขนาดของฟลักซ์ ขนาดของร่องงานเชื่อม กระแสไฟเชื่อม แรงดันอาร์ค และความเร็วของตัวนำเคลื่อน อย่างไรก็ตาม ค่าประมาณความสูงของแนวฟลักซ์ที่ถูกต้องก็คือ 25-35 มม. สำหรับอิเล็กโทรดเดี่ยวและ 30-45 มม. สำหรับ อิเล็กโทรดคู่

#### 3.4.5 อุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนและอุณหภูมิระหว่างเปลี่ยนที่เชื่อม

(Preheat and interpass temperature)

โดยปกติแล้วอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนและอุณหภูมิระหว่างเปลี่ยนที่เชื่อมที่ถูกต้องจะขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาของโลหะชิ้นงาน ค่าคาร์บอนเทียบเท่า (Carbon equivalent) ของโลหะชิ้นงาน กรรมวิธีในการเชื่อม ชนิดของวัสดุงานเชื่อม สิ้นเปลือง และเงื่อนไขในการเชื่อม ตารางที่ 3.16 แสดงข้อแนะนำทั่วไปของอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนและอุณหภูมิระหว่างเปลี่ยนที่เชื่อม สำหรับเหล็กกล้าเชื่อมต่ำด้านทานความร้อนแต่ละชนิดสำหรับข้อแนะนำอื่นๆ จะอ้างอิงถึง ASME Code , Sec , VIII , Div.2 Appendix 14

การให้ความร้อนก่อนเชื่อมนี้ควรจะให้พอเพียงกับพื้นที่บริเวณการเชื่อม รวมทั้งบริเวณที่ห่างจากร่องงานเชื่อมทั้งสองข้าง 50-100 มม. (หรือสามเท่าของความหนาของชิ้นงาน)

#### 3.4.6 การกระทำทางความร้อนหลังเชื่อม

(Postweld heat treatment)

ความจำเป็นในการกระทำทางความร้อนหลังการเชื่อมปกติแล้วควรจะทำเมื่อมีการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมและระหว่างเปลี่ยนที่เชื่อม ในที่มีความยุ่งยากการให้ความร้อนหลังการเชื่อมในทันทีด้วยอุณหภูมิประมาณ 300 °ซ. ควรจะกระทำก่อนที่จะปล่อยให้รอยเชื่อมเกิดการเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง ด้วยวิธีนี้การแตกร้าวเย็นก็อาจจะป้องกันได้

อุณหภูมิสำหรับการกระทำทางความร้อนหลังการเชื่อมขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กและมาตรฐานของสถาบันต่าง ๆ ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.17 ส่วนในกรณีสำหรับความเร็วในการให้ความร้อน เวลาในการให้ความร้อน และความเร็วในการเย็นตัว สำหรับเหล็กกล้าเชื่อมต่ำด้านทานความร้อนนั้น JIS Z3700 "Methods of Post Weld Heat Treatment" ได้กำหนดไว้ดังต่อไปนี้

1. ความเร็วในการให้ความร้อนเหนือ 425°ซ ควรเป็น :

$$200 \times 25/t \text{ (°ซ. / ซม.) สูงสุด กำหนดให้ } 220 \text{ °ซ. / ซม. สูงสุด}$$

55 °ซ. / ซม. ต่ำสุด โดยที่  $t$  = ความหนาสูงสุดของรอยเชื่อม

2. เวลาที่คงไว้ที่อุณหภูมิตามที่กำหนด ควรเป็น :

$\frac{1}{4}$  (ซม.) เมื่อ  $t = 6$  มม.

$t / 25$  เมื่อ  $6 > t \geq 125$  มม.

$5 + (t - 125) / 100$  (ซม.) เมื่อ  $t > 125$  มม.

3. ความเร็วในการเย็นตัวเหนือ 425 °ซ. ควรเป็น

$280 \times 25 / t$  (°ซ. / ซม.) สูงสุด กำหนดให้ 280 °ซ. / ซม. สูงสุด

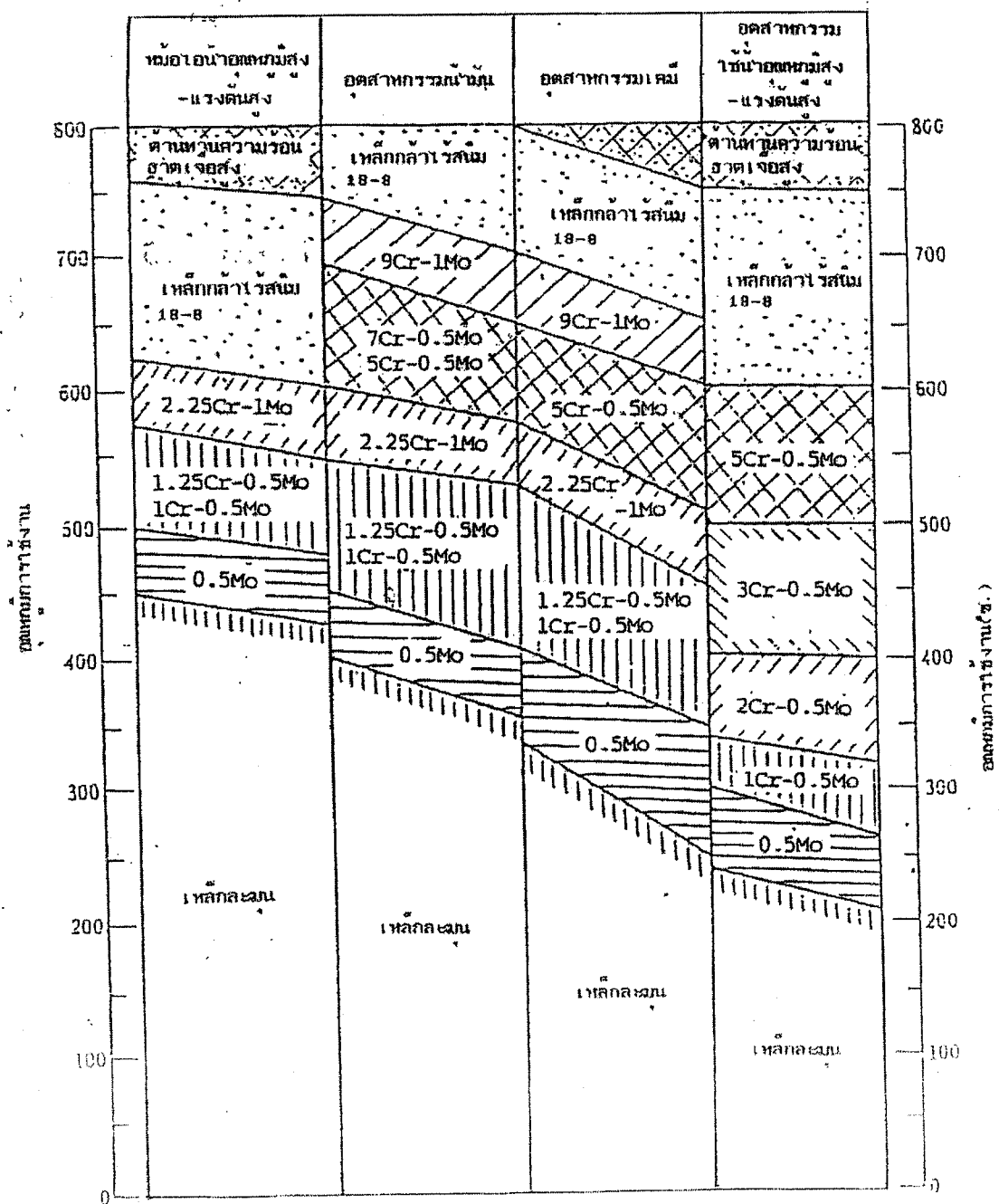
55 °ซ. / ซม. ต่ำสุด

ในกรณีที่งานเชื่อมมีขนาดใหญ่กว่าเตาที่ใช้ทำ PWHT ก็สามารถจะกระทำได้โดยการ  
ทำ PWHT เฉพาะที่ได้ ในการให้ความร้อนเฉพาะที่นั้นบริเวณที่ถูกกำหนดของรอยต่องานเชื่อม  
ต้องถูกให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอเพื่อที่จะรักษาวรรณรอยเชื่อมไว้ที่อุณหภูมิตามที่กำหนด  
สำหรับเวลาที่ระบุไว้ JIS Z3700 ได้กำหนดไว้ดังต่อไปนี้

1. บริเวณที่จะถูกให้ความร้อนต้องขยายออกไปทั้งสองข้างของรอยเชื่อมเป็นระยะอย่างน้อย 6 เท่าของความหนาแผ่นชิ้นงานจากศูนย์กลางของรอยเชื่อม
2. บริเวณที่จะถูกให้ความร้อนสามารถขยายออกไปทั้งสองข้างของรอยเชื่อมเป็นระยะอย่างน้อย 2 เท่าของความหนาของแผ่นชิ้นงานจากขอบของรอยเชื่อมที่มีความกว้างสูงสุด
3. บริเวณที่จะถูกให้ความร้อนสามารถขยายออกไปได้ทั้งสองข้างของรอยเชื่อมเป็นระยะอย่างน้อย 3 เท่าของความหนาของแผ่นชิ้นงานจากขอบของรอยเชื่อมที่มีความกว้างสูงสุดสำหรับท่อที่ยากในการวัดอุณหภูมิด้านในของท่อ

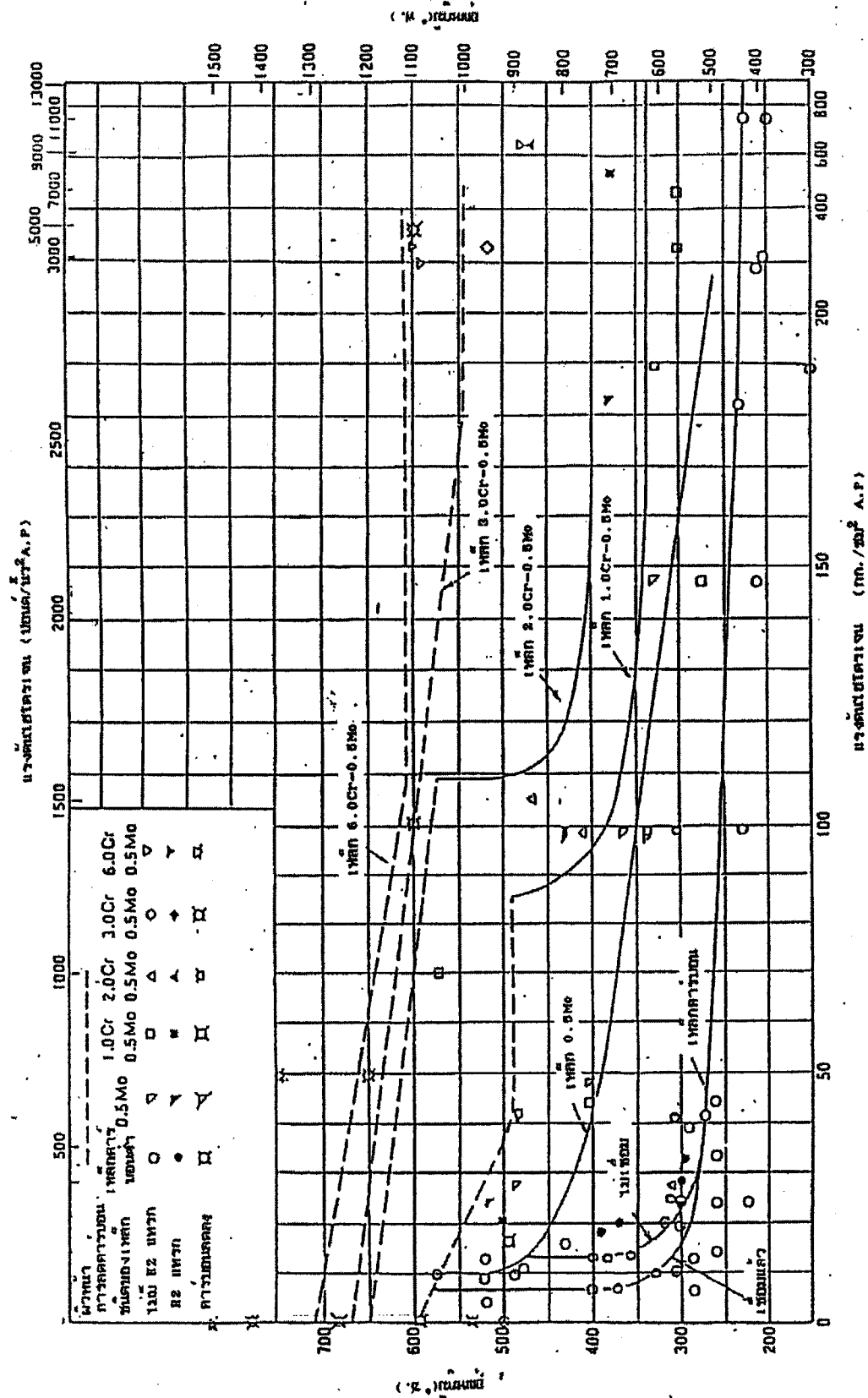
ชนิดของวัสดุ	ASTM		ส่วนสเปกทางเคมีโดยทั่วไป (%)											V
	เหล็ก	เหล็ก	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni				
C-0.5Mo	A204GrA	-	≤0.25	0.15/0.40	≤0.90	≤0.035	≤0.040	0.45/0.60	-	-	-	-	-	-
	" B	-	≤0.27	"	"	"	"	"	"	-	-	-	-	-
	" C	A182F1	≤0.28	"	"	"	"	"	"	-	-	-	-	-
	A387Gr2	A182F2	≤0.21	0.15/0.40	0.55/0.80	≤0.035	≤0.040	0.45/0.60	0.50/0.80	-	-	-	-	-
1Cr-0.5Mo	A387Gr12	A182F12	≤0.17	0.15/0.40	0.40/0.65	≤0.035	≤0.040	0.45/0.60	0.80/1.15	-	-	-	-	-
	A387Gr11	A182F11	≤0.17	0.50/0.80	0.40/0.65	≤0.035	≤0.040	0.45/0.65	1.00/1.50	-	-	-	-	-
	A387Gr22	A182F22	≤0.15	≤0.50	0.30/0.60	≤0.035	≤0.035	0.90/1.10	2.00/2.50	-	-	-	-	-
	A387Gr21	A182F21	≤0.15	≤0.50	0.30/0.60	≤0.035	≤0.035	0.90/1.10	2.75/3.25	-	-	-	-	-
5Cr-1Mo	A387Gr5	A182F5	≤0.15	≤0.50	0.30/0.60	≤0.030	≤0.030	0.45/0.65	4.00/6.00	-	-	-	-	-
	-	A182F7	≤0.15	0.50/1.00	0.30/0.60	≤0.030	≤0.030	0.44/0.65	6.0/8.0	-	-	-	-	-
	-	A182F9	≤0.15	0.50/1.00	0.30/0.60	≤0.030	≤0.030	0.90/1.10	8.0/10.0	-	-	-	-	-
	A533T.A		≤0.25	0.15/0.40	1.15/1.50	≤0.035	≤0.040	0.45/0.60	-	-	-	-	-	-
Mn-Mo and Mn-Mo-Ni	" T.B		"	"	"	"	"	"	-	0.40/0.70	-	-	-	-
	" T.C		"	"	"	"	"	"	-	0.70/1.00	-	-	-	-
	" T.D		"	"	"	"	"	"	-	0.20/0.40	-	-	-	-
	A508C11		≤0.35	0.15/0.40	0.40/1.05	≤0.025	≤0.025	≤0.10	≤0.25	≤0.40	≤0.05	-	-	-
Ni-Cr-Mo	" C11a		≤0.30	"	0.70/1.35	"	"	"	"	"	"	-	-	-
	" C12		≤0.27	"	0.50/1.00	"	"	0.55/0.70	0.25/0.45	0.50/1.00	"	-	-	-
	" C13		≤0.25	"	1.20/1.50	"	"	0.45/0.60	≤0.25	0.40/1.00	"	-	-	-

ตารางที่ 3.1 ชนิดของเหล็กกล้าเชื่อมต่อด้านความเค้น



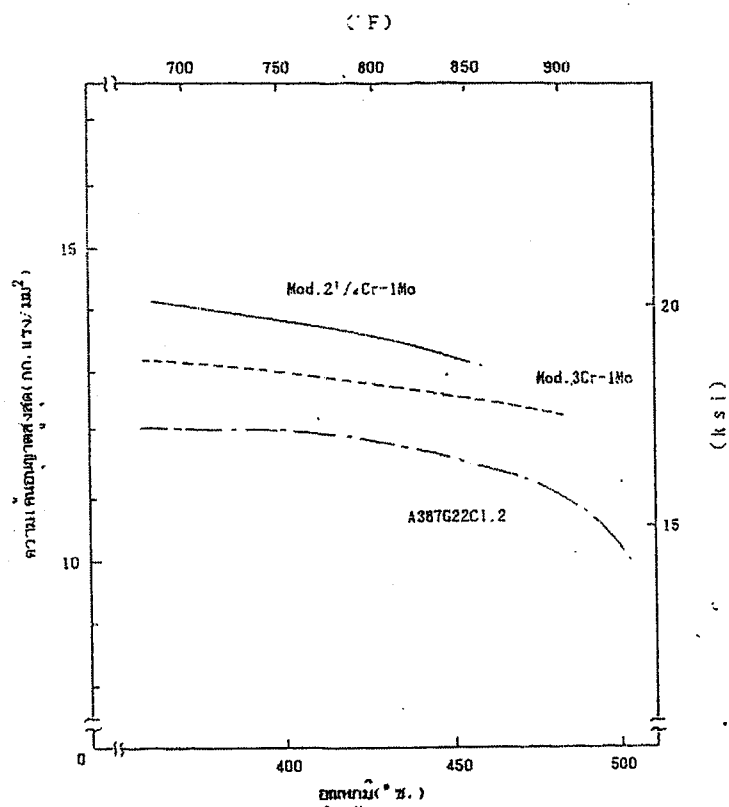
รูปที่ 3.1 ชนิดของเหล็กกล้าและการนำไปใช้งาน





ตารางที่ 3.2 ค่าจำกัดการใช้งานของเหล็กกล้าสำหรับถังรับความดันและแรงดันสูง

(G.A.Nelson, API Rev. – 77)



รูปที่ 3.3 ความเค้นอนุญาตสูงสุดสำหรับเหล็กที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลที่จำเป็นสำหรับเหล็กกล้าปรับสภาพสำหรับ  
ถังบำบัดน้ำเสียที่อุณหภูมิและแรงดันสูง

	ธรรมดา(1) 2 1/4 Cr-1Mo	เหนียว(2) 2 1/4 Cr-1Mo	3Cr-1Mo-(3) 1/4 V-Ti-B	2 1/4 Cr-1Mo-V(4)
คาร์บอน %	0.15 max.	0.11/0.15	0.10/0.15	0.11/0.15
มันกานีส %	0.30/0.60	0.30/0.60	0.30/0.60	0.30/0.60
ฟอสฟอรัส %	0.035 max.	0.015 max.	0.025 max.	0.015 max.
ซัลเฟอร์ %	0.035 max.	0.015 max.	0.025 max.	0.010 max.
ซิลิกอน %	0.50 max.	0.50 max.	0.10 max.	0.10 max.
โครเมียม %	2.00/2.50	2.00/2.50	2.75/3.25	2.00/2.50
โมลิบดีนัม %	0.90/1.10	0.90/1.10	0.90/1.10	0.90/1.10
ทองแดง %	—	0.25 max.	0.25 max.	0.20 max.
นิกเกิล %	—	0.25 max.	0.25 max.	0.25 max.
วานาเดียม %	—	0.02 max.	0.20/0.30	0.25/0.35
โคบอลต์ (%)	—	—	0.015/0.035	0.030 max.
โบรอน %	—	—	0.001/0.003	0.0020 max.
TS, ksi	75/100	85/110	85/110	85/110
(kgf/cm <sup>2</sup> )	(52.8/70.4)	(59.8/77.4)	(59.8/77.4)	(59.8/77.4)
0.2% YS, ksi	45 min.	55 min.	60 min.	60 min.
(kgf/cm <sup>2</sup> )	(31.7 min.)	(33.7 min.)	(42.2 min.)	(42.2 min.)
EL, %	18 min.	20 min.	18 min.	18 min.

(1) A387 Gr.22 (2) A542/A542M Type B, A508, A541

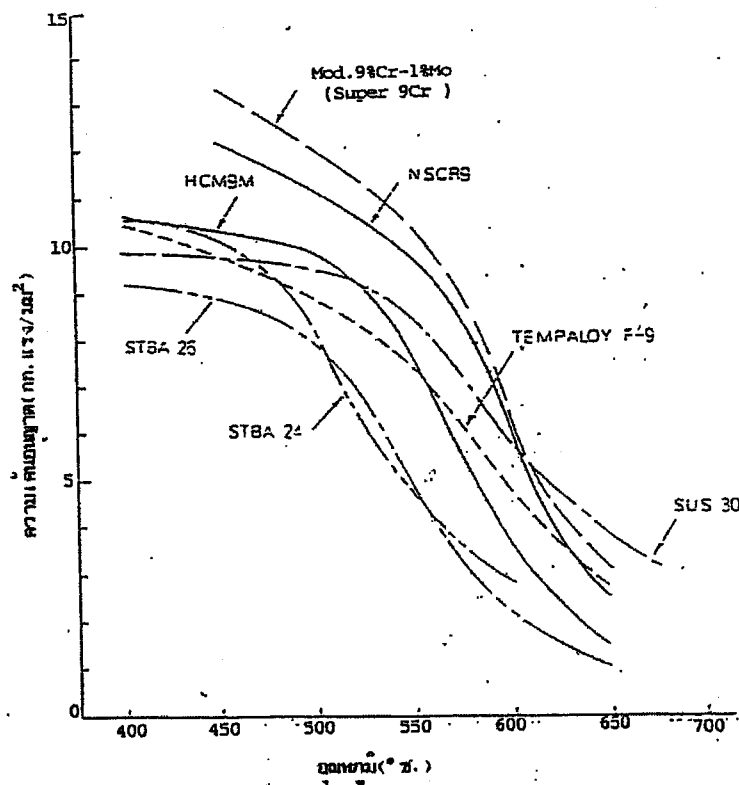
(3) A542/A542M Type C, A832/A832M-64, A182F3Y, A336F3Y, A308F3Y, A541F3Y

(4) 0.0010-0.0020 AF1/MP1

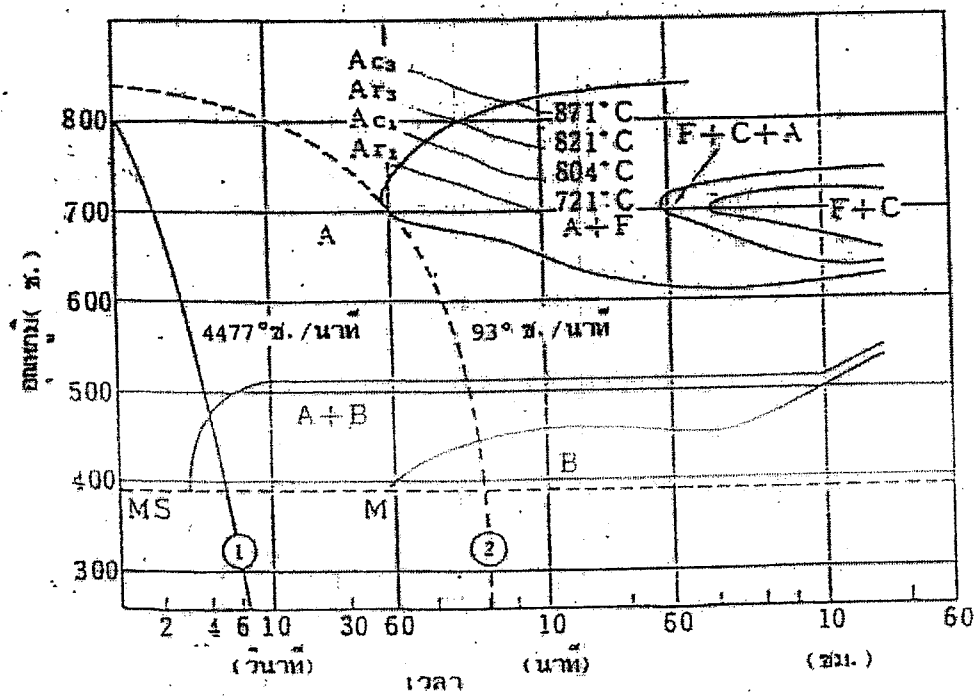
ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าชนิดความแข็งแรงสูง 9%Cr

ชนิดของเหล็ก	ชื่อผลิตภัณฑ์ ของเหล็ก	ส่วนผสมทางเคมี(%)													0.2%YS (kgf/cm <sup>2</sup> )	UTS (kgf/cm <sup>2</sup> )	EI (%)
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	V	NI	B	Al	H			
9Cr-1Mo-Nb-V	Mod. 9Cr-1Mo (Super 9Cr)	0.08 ?	0.2 ?	0.30 ?	≤ 0.02	≤ 0.01	8 ?	0.85 ?	0.06 ?	0.18 ?	≤ 0.2		≤ 0.04	0.03 0.07	53	58	27
	TEMPALLOY	0.04 ?	0.25 ?	0.40 ?	≤ 0.030	≤ 0.030	8.00 ?	0.90 ?	0.20 ?	0.15 ?	≤ ?	≤ 0.010	-	-			
	F-9	0.08	1.00	0.80			9.50	1.10	0.60	0.45					41	57	50
	HCH9K	≤ 0.08	≤ 0.50	0.30 ?	≤ 0.030	≤ 0.030	8.0 ?	1.8 ?	-	-	-	-	-	-	38	60	34
9Cr-2Mo																	
9Cr-2Mo-Nb-V	MSCR-9	≤ 0.10	≤ 0.50	≤ 1.50	≤ 0.030	≤ 0.020	8.0 ?	1.50 ?	≤ 0.10	≤ 0.20	-	-	-	-	54	69	30

(kgf/mm<sup>2</sup>) = กก. แรง/มม.<sup>2</sup>)

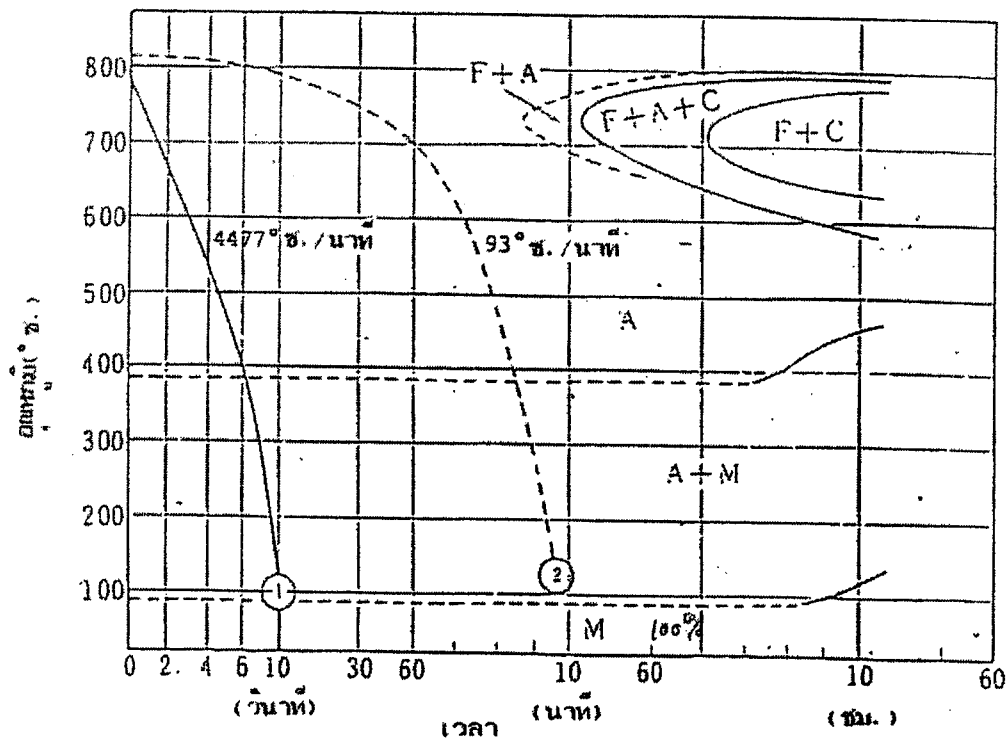


รูปที่ 3.4 อุณหภูมิที่ขึ้นอยู่กับความเค้นอนุญาตของเหล็กกล้าชนิดต่างๆ สำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูง

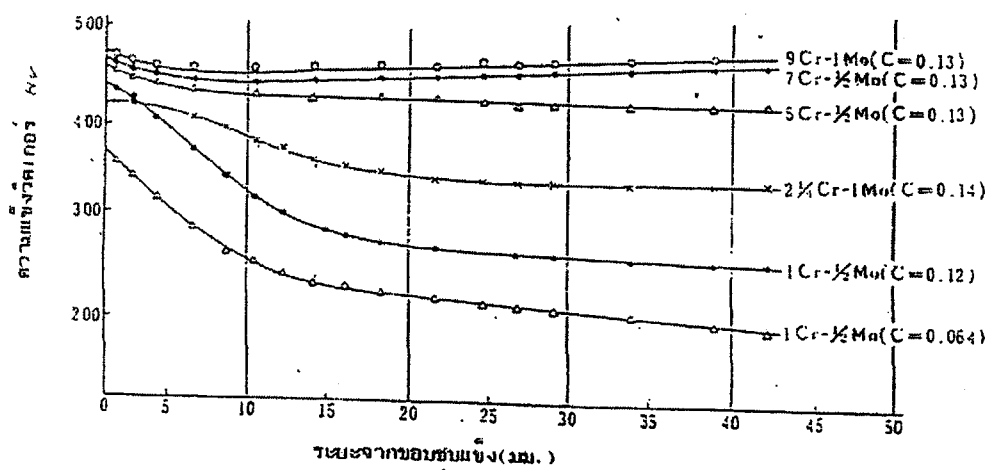


รูปที่ 3.5 เส้นโค้ง TTT สำหรับเหล็กกล้า 2.25%Cr-1%Mo

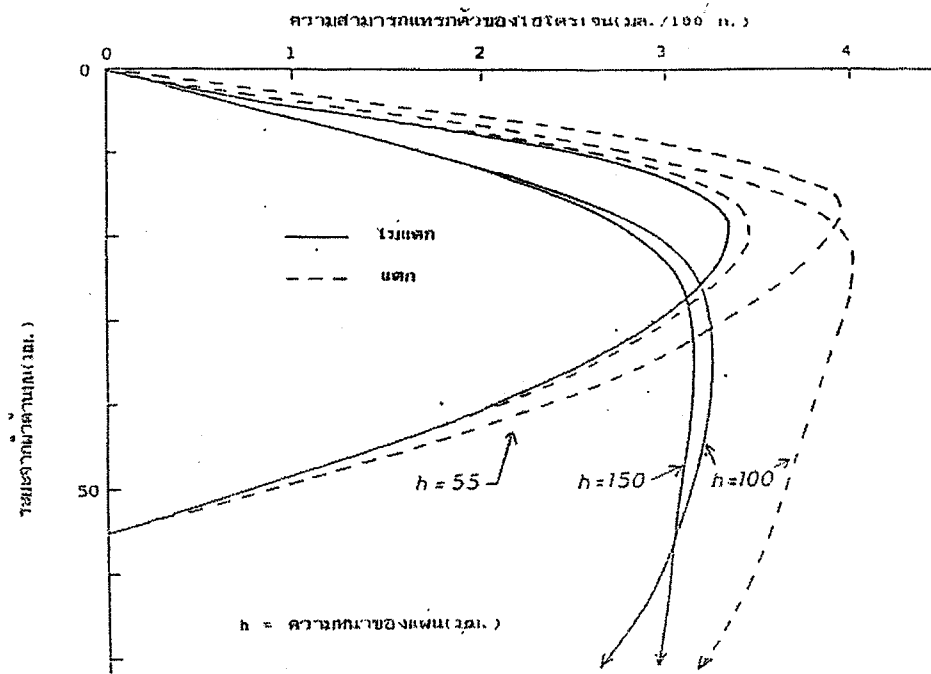
รูปที่ 3.5 เส้นโค้ง TTT สำหรับเหล็กกล้า 2.25%Cr-1%Mo



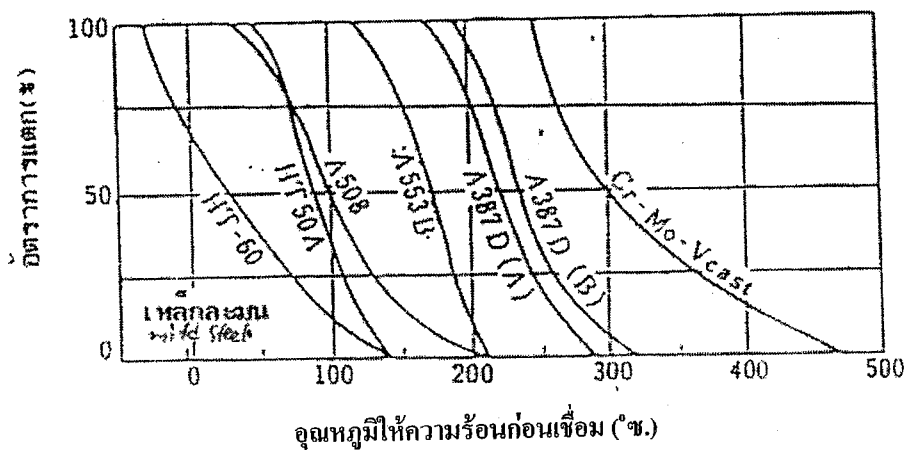
รูปที่ 3.6 เส้นโค้ง TTT สำหรับเหล็กกล้า 5%Cr-0.5%Mo



รูปที่ 3.7 ผลทดสอบความสามารถในการแข็งตัวของเหล็กกล้าชนิด Cr-Mo โดยวิธีการชุบแข็ง



รูปที่ 3.8 ความไวในการแตกร้าวและความสามารถแพร่กระจายตัวของไฮโดรเจนในรอยเชื่อม เหล็กกล้า 2.25%Cr-1%Mo โดยการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุม

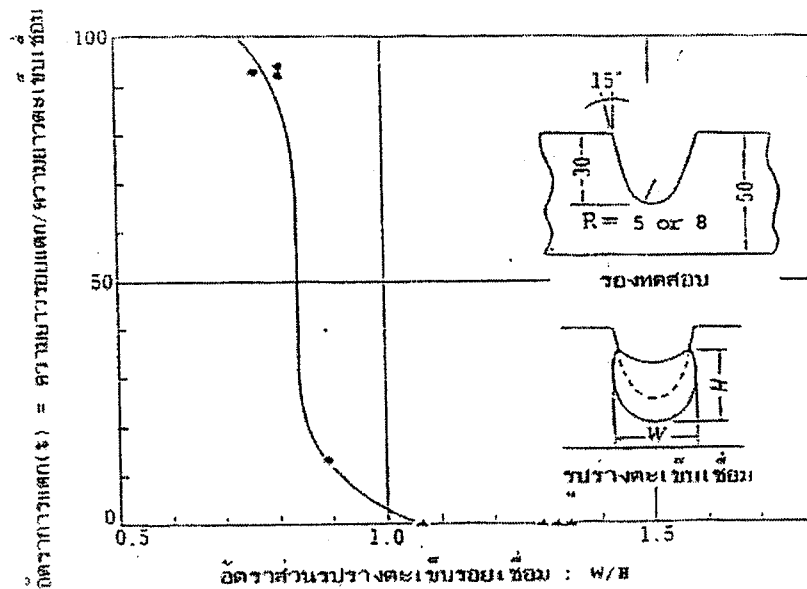


รูปที่ 3.9 ผลของอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนเชื่อม ต่อความไวในการแตกร้าวของรอยเชื่อม เหล็กกล้า ชนิดต่างๆ

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าที่ใช้ในการทดสอบ

ชนิดของเหล็ก	หนา (มม.)	ส่วนผสมทางเคมี (%)										คุณสมบัติทางกล		
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Y.S. (kgf/cm <sup>2</sup> )	T.S. (kgf/cm <sup>2</sup> )	EL. (%)
เหล็กกล้า	35	0.13	0.18	0.88	0.014	0.020	—	—	—	—	—	29.0	46.0	28
HT-50A	32	0.16	0.39	1.35	0.019	0.015	—	—	—	—	—	38.0	55.0	23
HT-60	37	0.13	0.50	1.25	0.013	0.010	0.22	—	—	0.09	—	55.1	64.2	21
ASTM A533B	30	0.16	0.25	1.31	0.020	0.012	0.09	0.55	0.60	—	0.26	43.6	60.0	28
ASTM A387D(A)	32	0.08	0.16	0.42	0.025	0.019	2.06	—	0.93	—	—	45.0	62.0	23
ASTM A387D(B)	32	0.15	0.30	0.55	0.011	0.012	2.41	—	1.01	—	—	43.0	60.0	37
ASTM A508	32	0.16	0.34	0.66	0.005	0.011	0.37	0.78	0.59	—	—	52.0	65.1	28
Cr-Mo-V cast	30	0.18	0.45	0.62	0.010	0.008	1.05	0.29	0.98	0.26	0.14	63.4	72.5	23





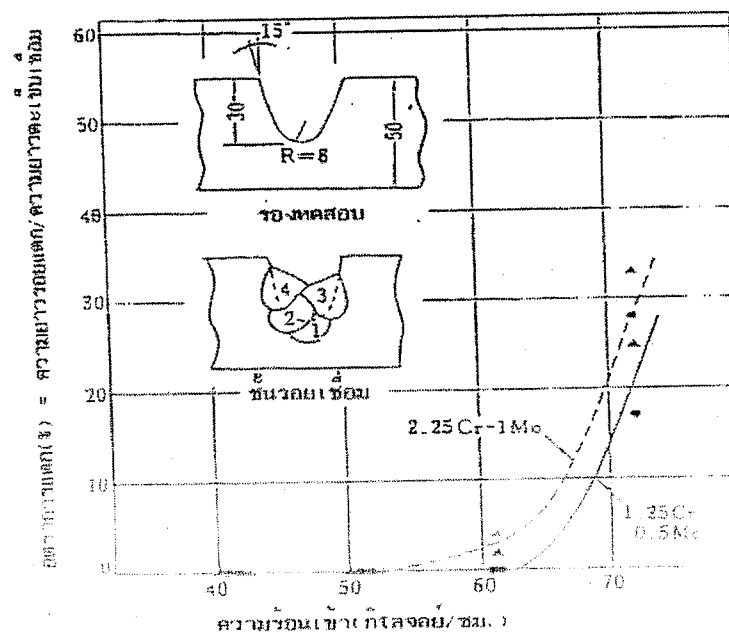
รูปที่ 3.12 ผลของรูปร่างตะเข็บรอยเชื่อมต่อความไวในการแตกร้าวของรอยเชื่อมเหล็กกล้า

2.25%Cr-1%Mo ( : R = 5 มม., : R = มม.)

เงื่อนไขในการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุม : ขนาดเส้นลวดเส้นผ่าศูนย์กลาง = 4.8 มม.,

ฟลักซ์ = ชนิดหลอมละลาย, กระแสไฟ = 650 – 700 A, แรงดัน = 30 โวลต์,

ความเร็ว = 30 ซม./นาที



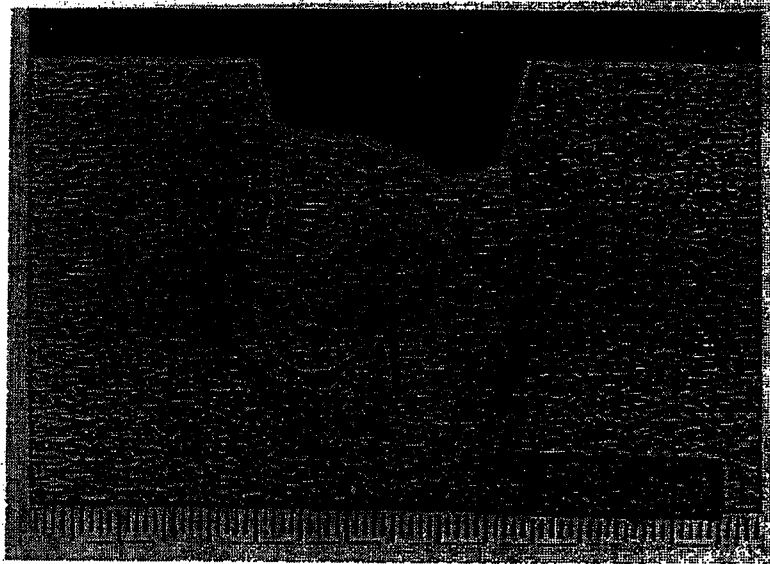
รูปที่ 3.13 ผลของความร้อนเข้าต่อการแตกร้าวร้อนของรอยเชื่อมเหล็กกล้า Cr-Mo สองชนิด

เงื่อนไขในการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุม : ขนาดเส้นลวดเส้นผ่าศูนย์กลาง = 4.8 มม.,

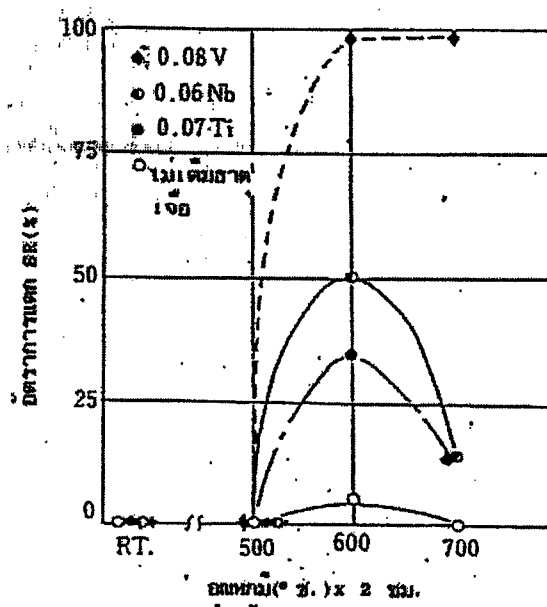
ฟลักซ์ = ชนิดหลอมละลาย, กระแสไฟ = 600-1000A, แรงดัน = 35 โวลต์,

ความเร็ว = 30 ซม./นาที

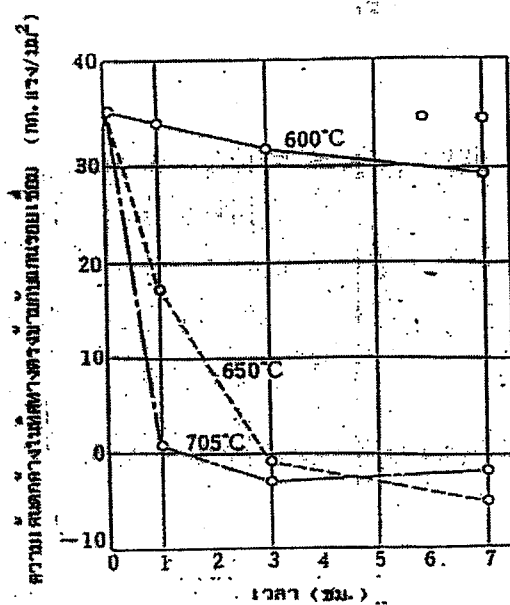




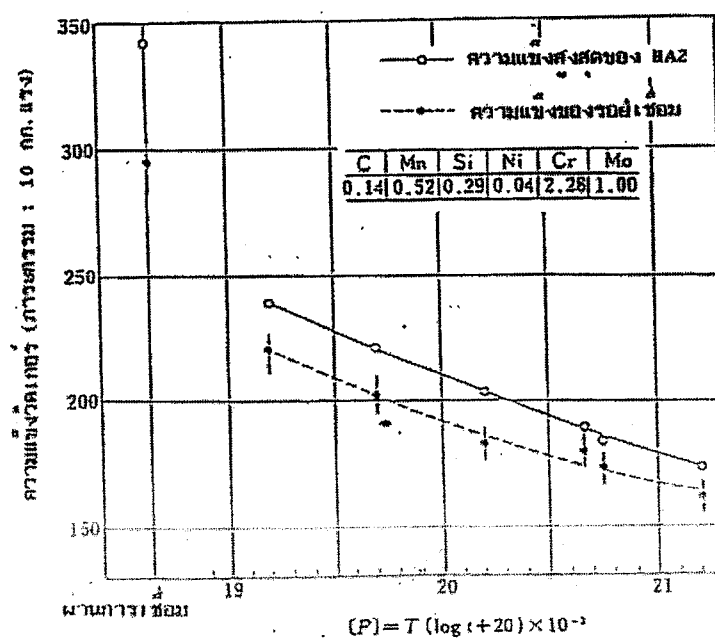
รูปถ่ายที่ 3.1 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้า 1.25%Cr-0.5%Mo  
ที่มีรอยแตกร้าวร้อน ในการทดสอบตามรูปที่ 3.13



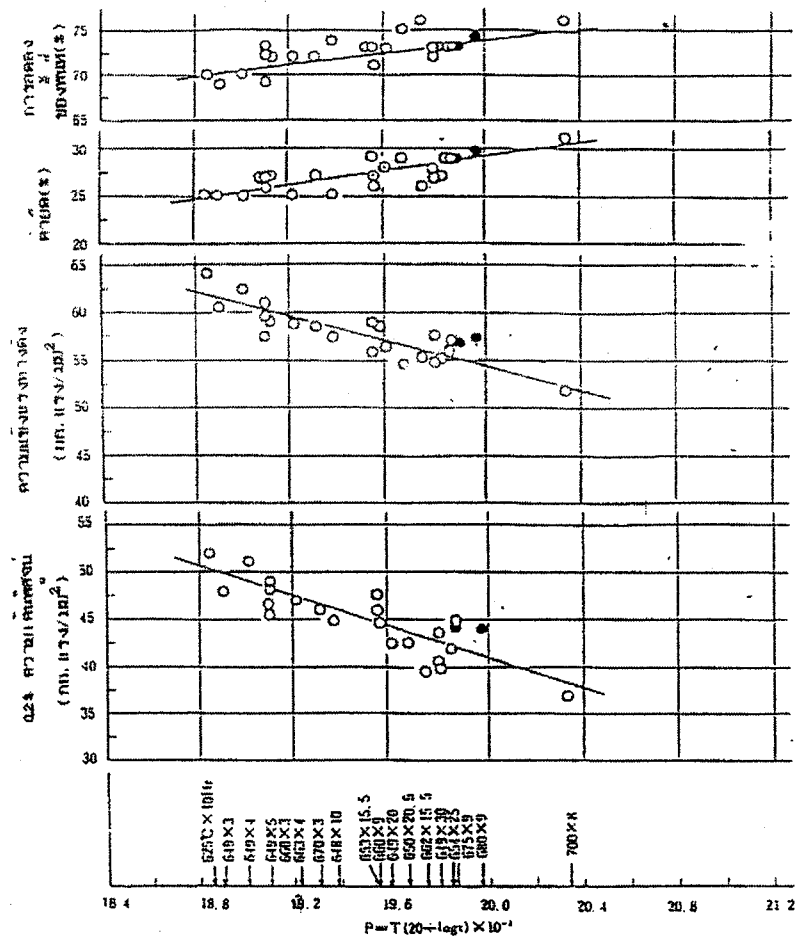
รูปที่ 3.14 ผลของธาตุเจือและอุณหภูมิ SR ต่อความไวในการแตกร้าว SR ของเหล็กกล้า  
0.16%C-0.99%Cr-0.46%Mo-0.60%Mn-0.30%Si (โดยการทดสอบการแตกร้าวกักตัว  
ร่องตัว y



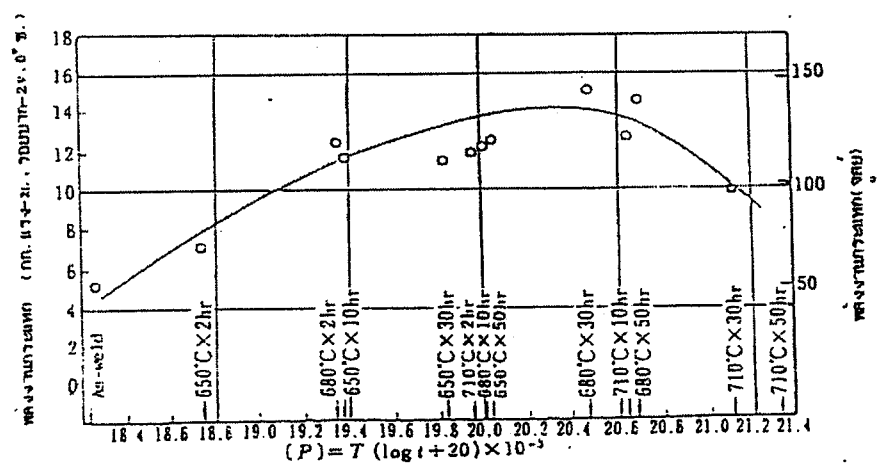
รูปที่ 3.15 ผลของการให้ความร้อนหลังการเชื่อมต่อการปลดความเค้นของรอยเชื่อมเหล็กกล้า 2.25%-1%Mo



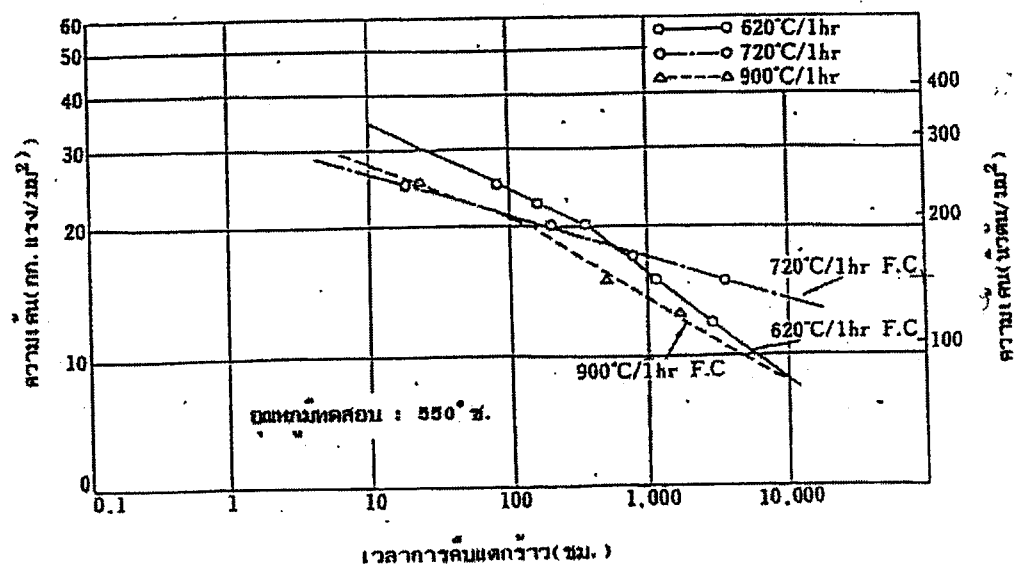
รูปที่ 3.16 ความแข็งแรงของโลหะรอยเชื่อม 2.25%Cr-1%Mo ในฟังก์ชันของตัวแปรการออกแบบ (เหล็กกล้า : A387 Gr.D, หนา 150 มม.)



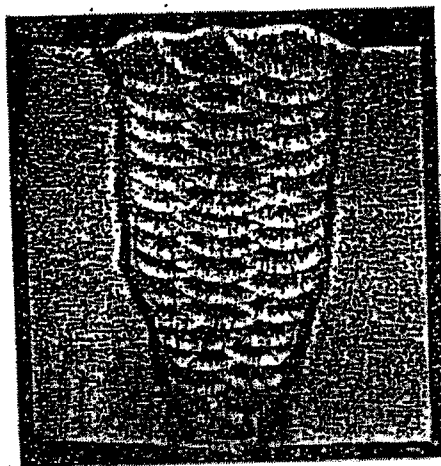
รูปที่ 3.17 สมบัติทางกลของโลหะรอยเชื่อม 1.25%Cr-0.5% Mo โดยการเชื่อมอาร์คฟลักซ์  
กลุ่มในฟังชั่นของตัวแปรการอบคืนแล้ว



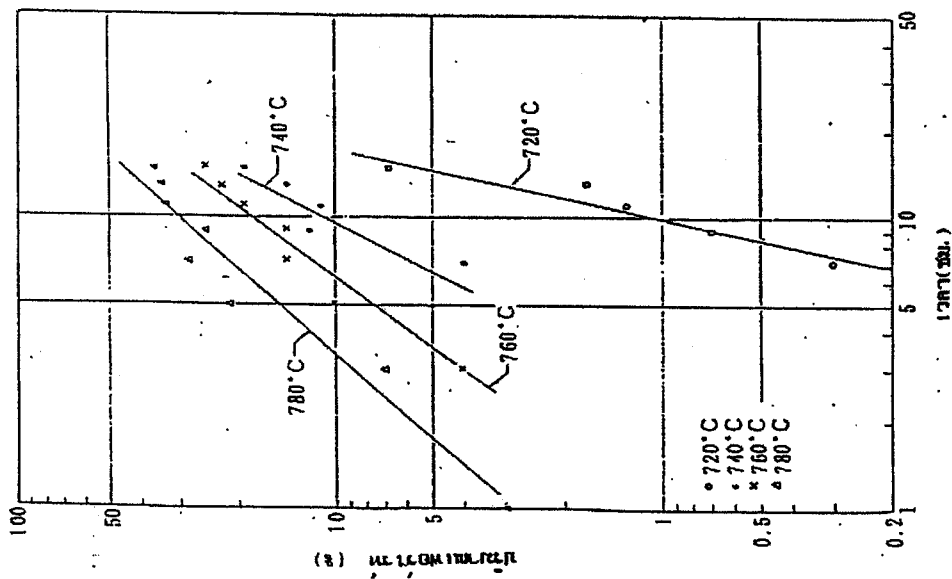
รูปที่ 3.18 พลังงานการกระแทกของโลหะรอยเชื่อม 1.25%Cr-0.5%Mo ในฟังก์ชันของตัวแปรการอบคืนตัว



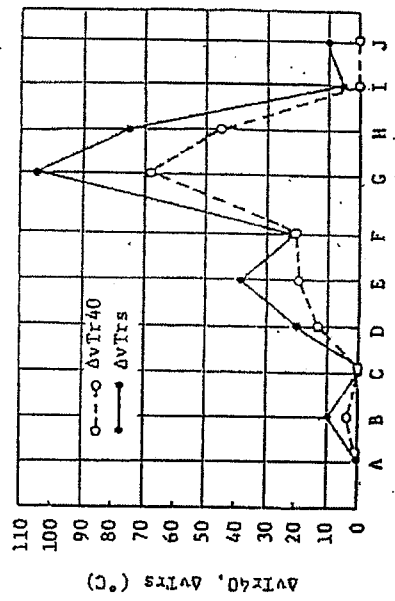
รูปที่ 3.19 ผลของการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ต่อความแข็งแรงการคืบแตกของโลหะรอยเชื่อม 2.25%Cr-1%Mo



รูปถ่ายที่ 3.2 โครงสร้างมหภาคของโลหะรอยเชื่อม 2.25%Cr-1%Mo ที่มีแถบเฟอร์ไรท์



รูปที่ 3.20 อุณหภูมิและเวลาที่ขึ้นกับการตกตะกอนแถบเฟอร์ไรต์ของ โลหะรอยเชื่อม 2.55% Cr-1%Mo

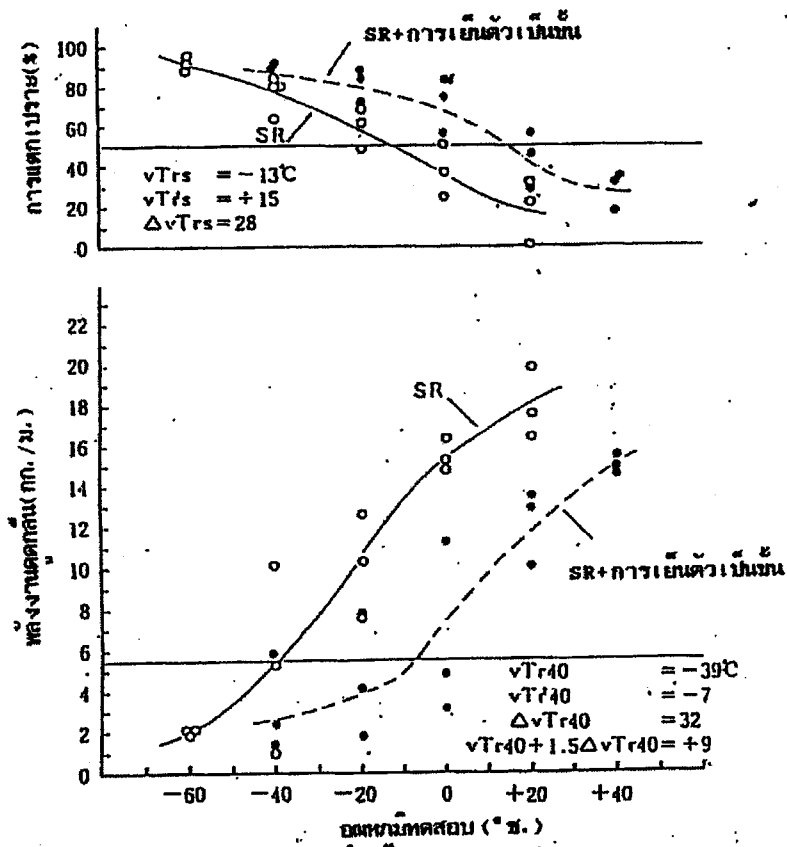


A: 0.5Mo  
 B: 1.25Cr-0.5Mo  
 C: 1.25Cr-0.5Mo  
 D: 1.25Cr-0.5Mo  
 E: 2.25Cr-1Mo  
 F: 2.25Cr-1Mo  
 G: 2.25Cr-1Mo  
 H: 3Cr-1Mo  
 I: 5Cr-0.5Mo  
 J: 9Cr-1Mo

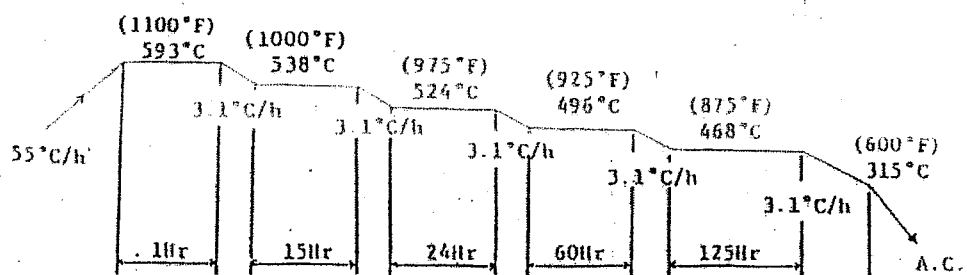
ขนาดความหนา (C ≤ 0.05%)  
 ขนาดวงเหล็ก

ขนาดความหนา (C ≤ 0.05%)  
 ขนาดวงเหล็ก

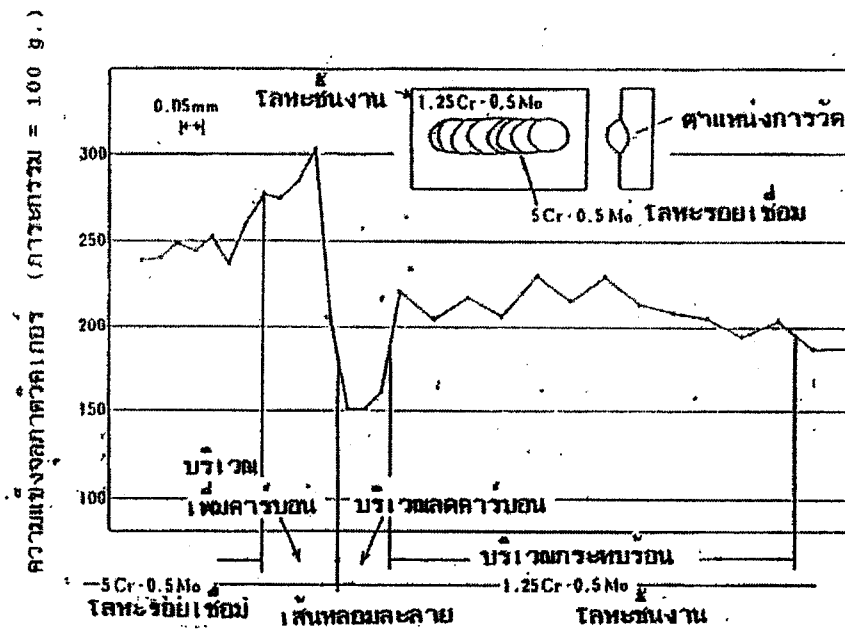
รูปที่ 3.21 การเปรียบเทียบความไวต่อการแปรสภาพเมื่อเป็นต้นตัวของโลหะ รอยเชื่อม Cr-Mo ชนิดต่างๆ (SMAW)



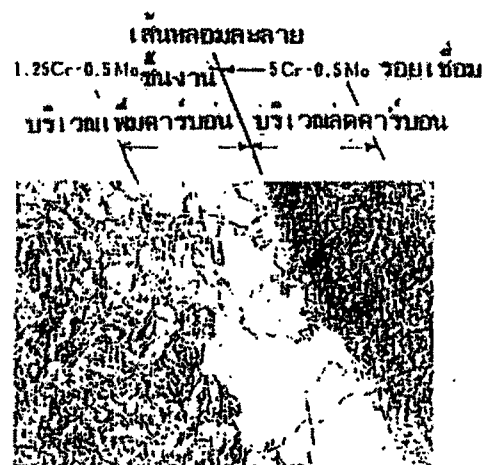
รูปที่ 3.22 ผลการทดสอบการแตกเปราะในการอบคืนตัวของโลหะรอยเชื่อม 2.25%Cr-1%Mo



รูปที่ 3.23 ชนิดของการเย็นตัวแบบเป็นขั้นหรือการอบคืนตัวความเปราะ



รูปที่ 3.24 การกระจายตัวความแข็งของการต่อโลหะต่างชนิดกันระหว่างโลหะชิ้นงาน 1.25%Cr-0.5%Mo และรอยเชื่อม 5%Cr-0.5%Mo หลังจาก 700 °ซ. X 8 ชม. ของการให้ความร้อนหลังการเชื่อม



รูปถ่ายที่ 3.3 โครงสร้างจุลภาคของการต่อโลหะต่างชนิดกันหลังจากการทำ PWHT (X150)

โลหะชิ้นงาน = 1.25%Cr-0.5%Mo,

โลหะรอยเชื่อม = 5%Cr-0.5%Mo

PWHT = 700 °ซ. X 8 ชม.

ตารางที่ 3.5 มาตรฐานของอิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลักลำโพงและหลักลำโพงโมโนสเตอริโอ (JIS Z 3223-82)

ชนิดของ อิเล็กทรอนิกส์	ชนิดของอุปกรณ์	(1) ชนิดของ กระแสไฟ	ส่วนสมทาง: ค่าร้อยละ (%) (2)				คุณสมบัติทางกลของเนื้อโลหะ			(3) การกระทำ ความร้อน
			C	Mn	Si	Cr	Mo	ค่าแรงดึง กก./แรง/มม. <sup>2</sup> (นิ้วตัน/มม. <sup>2</sup> )	ค่าลดคราก กก./แรง/มม. <sup>2</sup> (นิ้วตัน/มม. <sup>2</sup> )	ค่ายึด (%)
DT1216	ชนิดไฮโดรเจนต่ำ	AC or DC (+)	≤ 0.12	≤ 0.90	≤ 0.80	—	0.40~0.65	≥ 50 (≥ 490)	≥ 40 (≥ 390)	≥ 25
DT2315	ชนิดไฮโดรเจนต่ำ	DC (+)	≤ 0.05	≤ 0.90	≤ 1.00	1.00~1.50	0.40~0.65			≥ 19
DT2313	ชนิดไฮโดรเจนต่ำ	AC or DC (-)								≥ 16
DT2316	ชนิดไฮโดรเจนต่ำ	AC or DC (+)	≤ 0.12	≤ 0.80	≤ 0.80	1.00~1.50	0.40~0.65	≥ 57 (≥ 550)	≥ 47 (≥ 450)	≥ 19
DT2318	ชนิดไฮโดรเจนต่ำ	AC or DC (+)								≥ 19
DT2415	ชนิดไฮโดรเจนต่ำ	DC (+)	≤ 0.05	≤ 0.90	≤ 1.00	2.00~2.50	0.90~1.20			≥ 17
DT2413	ชนิดไฮโดรเจนต่ำ	AC or DC (-)								≥ 14
DT2416	ชนิดไฮโดรเจนต่ำ	AC or DC (+)	≤ 0.12	≤ 0.90	≤ 0.80	2.00~2.50	0.90~1.20	≥ 64 (≥ 630)	≥ 54 (≥ 530)	≥ 17
DT2418	ชนิดไฮโดรเจนต่ำ	AC or DC (+)								≥ 17
DT2516	ชนิดไฮโดรเจนต่ำ	AC or DC (+)	≤ 0.10	≤ 0.75	≤ 0.90	4.00~6.00	0.45~0.65	≥ 45 (≥ 440)	—	≥ 25

หมายเหตุ (1) ค่าจำกัดความของเครื่องหมายที่ใช้สำหรับชนิดของกระแสไฟ

AC = กระแสไฟฟ้าสลับ, DC (-) = กระแสไฟฟ้าตรงอิเล็กทรอนิกส์

DC (+) = กระแสไฟฟ้าตรง อิเล็กทรอนิกส์

ปริมาณของ P และ S น้อยกว่า 0.040 %

ปริมาณของ S ใน DT 2516 น้อยกว่า 0.030 %

ปริมาณของ Ni ใน DT 2516 น้อยกว่า 0.40 %

(3) การกระทำทางความร้อน

a อุณหภูมิ 620 ± 15 °C เป็นเวลา 1 ชม. แล้วเย็นในเตาดำยอัตรา 180 ± 15 °C/ชม.

จนถึง 315 °C แล้วจึงให้เย็นในอากาศ

b อุณหภูมิ 650 ± 15 °C เป็นเวลา 1 ชม. แล้วเย็นในเตาดำยอัตรา 180 ± 15 °C/ชม.

แล้วจึงทำให้เย็นในอากาศ

c อุณหภูมิ 855 ± 15 °C เป็นเวลา 1 ชม. แล้วเย็นในเตาดำยอัตราน้อยกว่า 55 °C/ชม.

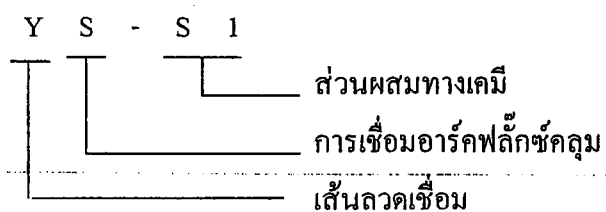
จนถึง 550 °C แล้วจึงให้เย็นในอากาศ



ตารางที่ 3.6 การแบ่งประเภทของเส้นลวดเชื่อม (JIS Z 3351)

การแบ่งประเภท	ชนิด	การแบ่งประเภท	ชนิด
YS-S1 YS-S2 YS-S3 YS-S4 YS-S5 YS-S6 YS-S7 YS-S8	ชนิด Si - Mn	YS-N1 YS-N2	Ni Type
		YS-NM1 YS-NM2 YS-NM3 YS-NM4 YS-NM5 YS-NM6	ชนิด Ni - Mo
YS-M1 YS-M2 YS-M3 YS-M4 YS-M5	ชนิด Mo	YS-NCM1 YS-NCM2 YS-NCM3 YS-NCM4 YS-NCM5 YS-NCM6	ชนิด Ni - Cr - Mo
YS-CM1 YS-CM2 YS-CM3 YS-CM4 YS-CM5 YS-1CM1 YS-1CM2 YS-2CM1 YS-2CM2 YS-3CM1 YS-3CM2 YS-5CM1 YS-5CM2	ชนิด Cr - Mo	YS-CuC1 YS-CuC2	ชนิด Cu - Cr
		YS-G	-

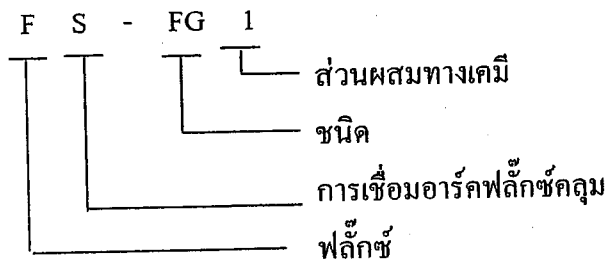
หมายเหตุ ตัวอย่างของตัวย่อ



ตารางที่ 3.7 การแบ่งประเภทของฟลักซ์ (JIS Z 3352)

การแบ่งประเภท	ชนิด
FS – FG1	ฟลักซ์ชนิดหลอม
FS – FG2	
FS – FG3	
FS – FG4	
FS – FP1	ฟลักซ์ชนิดหลอม (ชนิดโปร่ง)
FS – BN1	ฟลักซ์ชนิดกาวประสาน
FS – BN2	
FS – BT1	ฟลักซ์ชนิดกาวประสาน (ชนิดผงเหล็ก)
FS – BT2	

หมายเหตุ ตัวอย่างของตัวย่อ

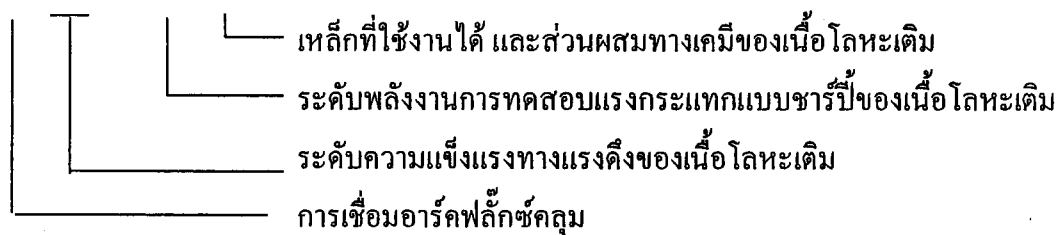


ตารางที่ 3.8 การแบ่งประเภทของเนื้อโลหะเดิม (JIS Z 8183)

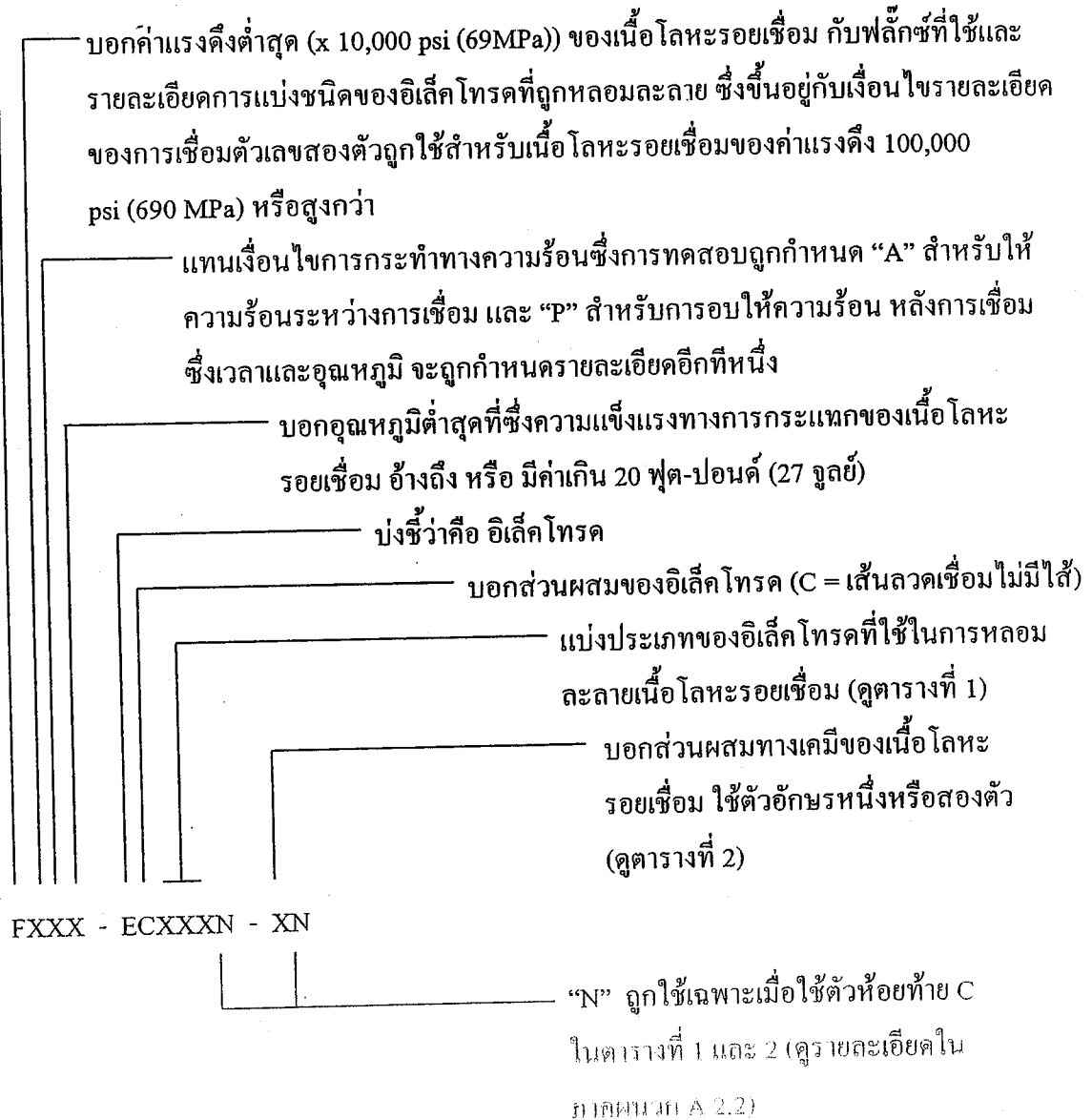
การแบ่งประเภท	การใช้งาน
S42X-S	เหล็กถลุง
S50X-H S58X-H S62X-HX S70X-HX S80X-HX	เหล็กกล้าทนแรงดึงสูง
SXXX-M SXXX-CM SXXX-1CM SXXX-2CM SXXX-3CM SXXX-5CM SXXX-MN	เหล็กกล้าต้านทานความร้อน
S50X-AX S58X-AX	เหล็กกล้าต้านทานการกัดกร่อนในบรรยากาศ

หมายเหตุ ตัวอย่างของตัวย่อ

S 42 1 - S



## บ่งชี้ว่าคือ ฟลักซ์



### ตัวอย่าง

E9PO-EB3-B3 หมายถึง ฟลักซ์ที่จะช่วยให้ได้เนื้อโลหะรอยเชื่อมซึ่ง : ในเงื่อนไขกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม, จะได้ค่าแรงดึงไม่ต่ำกว่า 90,000 psi และการทดสอบแรงกระแทก แบบรอบบาก วิ ชาร์ปี มีค่าอย่างน้อย 20 ฟุต-ปอนด์ที่ 0°F เมื่อหลอมละลายด้วยอิเล็กโทรด EB3 ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดในรายละเอียดนี้ และส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะเป็น B3



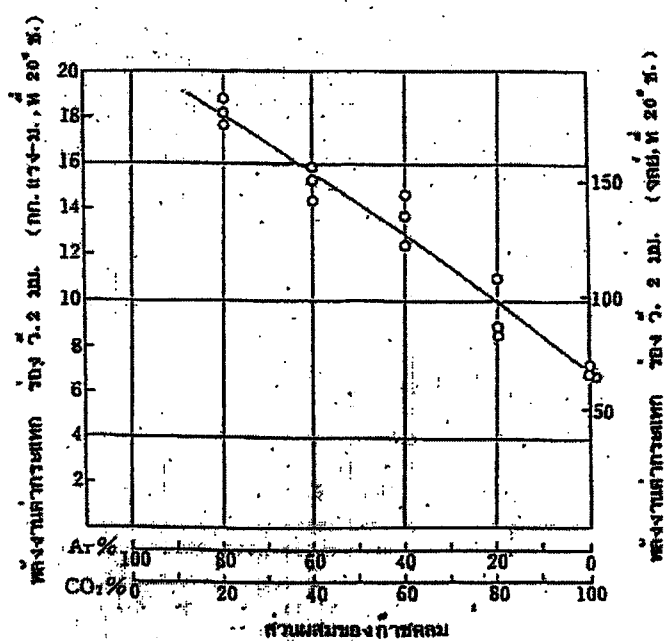
ตารางที่ 3.10 เติมลาวเชื่อมและแท่งลวดเชื่อมเหล็กกล้าเพื่อสำหรับการเชื่อมทิก (JIS Z 3316\_

คุณสมบัติทางกลของโลหะเชื่อม																			
ประเภท	ค่าผสมทางเคมีของแท่งลวดเชื่อม(*)													คุณสมบัติทางกลของโลหะเชื่อม					
	C	Si	Mn	P	S	(1) Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Ti	Zr	Others	T.S. (kgf/mm <sup>2</sup> ) (N/mm <sup>2</sup> )	Y.S. (kgf/mm <sup>2</sup> ) (N/mm <sup>2</sup> )	E1 (%)	ค่าความเค้น		
																	ความเค้น (kgf/mm <sup>2</sup> )	ความเค้น (N/mm <sup>2</sup> )	
YG150	0.15 max	1.00 max	1.90 max	0.030 max	0.030 max	0.50 max	-	-	-	0.15 max	0.15 max	0.12 max	0.50 max	50 (490)	40 (390)	22	0	4.8 (47)	As-weld
YG180	0.15 max	1.00 max	2.00 max	0.025 max	0.025 max	0.50 max	1.80 max	0.70 max	0.65 max	-	Ti+Zr 0.20max	-	0.50 max	80 (580)	45 (440)	17	-20	4.0 (39)	As-weld
YG162	0.15 max	1.00 max	2.25 max	0.025 max	0.025 max	0.50 max	1.80 max	0.70 max	0.65 max	-	Ti+Zr 0.20max	-	0.50 max	62 (810)	51 (500)	17	-20	4.0 (39)	As-weld
YG170	0.15 max	0.80 max	2.25 max	0.025 max	0.025 max	0.50 max	2.60 max	0.60 max	0.65 max	-	-	-	0.50 max	70 (890)	58 (550)	16	-20	4.0 (39)	As-weld
YG180	0.15 max	0.80 max	2.25 max	0.025 max	0.025 max	0.50 max	3.80 max	0.60 max	0.90 max	-	-	-	0.50 max	80 (790)	68 (670)	15	-20	4.0 (39)	As-weld
YG16	0.05 -0.15	0.80 max	2.00 max	0.025 max	0.025 max	0.40 max	-	-	0.40 -0.65	-	-	-	0.50 max	50 (490)	40 (390)	25	0	4.8 (47)	620 ± 15°C x 1hr FC
YG16L	0.05 max	0.80 max	1.60 max	0.025 max	0.025 max	0.40 max	-	-	0.40 -0.85	-	-	-	0.50 max	42 (410)	31 (210)	25	0	4.8 (47)	620 ± 15°C x 1hr FC
YG16CH	0.05 -0.15	0.80 max	1.60 max	0.025 max	0.025 max	0.40 max	-	1.00 -1.50	0.40 -0.65	-	-	-	0.50 max	57 (560)	47 (460)	19	0	4.8 (47)	690 ± 15°C x 1hr FC
YG16CL	0.05 max	0.80 max	1.60 max	0.025 max	0.025 max	0.40 max	-	1.00 -1.50	0.40 -0.85	-	-	-	0.50 max	53 (520)	32 (310)	20	0	4.8 (47)	690 ± 15°C x 1hr FC
YG12CH	0.05 -0.15	0.80 max	1.60 max	0.025 max	0.025 max	0.40 max	-	2.00 -2.70	0.90 -1.20	-	-	-	0.50 max	84 (630)	54 (530)	17	0	4.8 (47)	690 ± 15°C x 1hr FC
YG12CL	0.05 max	0.80 max	1.60 max	0.025 max	0.025 max	0.40 max	-	2.00 -2.70	0.90 -1.20	-	-	-	0.50 max	53 (520)	32 (310)	20	0	4.8 (47)	690 ± 15°C x 1hr FC
YG13CH	0.15 max	0.80 max	1.60 max	0.025 max	0.025 max	0.40 max	-	2.70 -3.50	0.90 -1.20	-	-	-	0.50 max	84 (630)	54 (530)	17	0	4.8 (47)	690 ± 15°C x 1hr FC
YG15CH	0.15 max	0.80 max	1.60 max	0.025 max	0.025 max	0.40 max	-	4.00 -6.00	0.45 -0.65	-	-	-	0.50 max	50 (490)	30 (290)	16	0	4.8 (47)	740 ± 15°C x 1hr FC

(max. = ค่าขีด, min. = ค่าต่ำสุด, hr. = ชั่วโมง, FC. = เย็นในเตา, As-weld = ผ่านการเชื่อม)

(kgf/mm<sup>2</sup> = กก. ตร./ว.ม.), N/mm<sup>2</sup> = นิวตัน/ว.ม., E1 = ค่าความเค้น, As-weld = ผ่านการเชื่อม)

หมายเหตุ (1) ปริมาณของแก๊สในแท่งลวดเชื่อมที่แสดงไว้



รูปที่ 3.26 ผลของส่วนผสมก๊าซคลุมที่มีต่อพลังงานการกระแทกของโลหะรอยเชื่อม  
1.25%Cr-0.5%Mo (PWHT : 690°ซ x 1 ชม.)

ตารางที่ 3.11 ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของลวดเชื่อม 2.25%Cr-1%Mo และ 3%Cr-1%Mo สำหรับถังรับน้ำหนักน้ำเสียอุณหภูมิและแรงดันสูง

ชนิดของเหล็ก	กรรมวิธี การเชื่อม	ชื่อการค้า	ส่วนผสมทางเคมีของโลหะรอยเชื่อม(%)								
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Nb
2½Cr-1Mo	SMAW	CAM-106H	0.08	0.33	0.51	0.005	0.005	2.33	1.01	0.30	0.02
	SAW	PF-500/US-521H	0.10	0.14	0.57	0.005	0.004	2.35	0.97	0.27	0.01
	GTAW	TGS-2CMH	0.11	0.13	0.36	0.005	0.005	2.27	1.05	0.23	0.03
3Cr-1Mo	SMAW	CM-3H	0.09	0.35	0.57	0.007	0.007	3.03	1.01	0.31	0.03
	SAW	PF500/US-531H	0.10	0.13	0.66	0.008	0.006	3.02	1.00	0.29	0.02
	GTAW	TGS-3CMH	0.12	0.16	0.37	0.006	0.007	2.33	1.03	0.23	0.03
ชนิดของเหล็ก	กรรมวิธี การเชื่อม	ชื่อการค้า	อุณหภูมิ ทดสอบ (°F.)	0.2% S N/mm2 (kgf/mm2)	T.S N/mm2 (kgf/mm2)	El(1) %	I.V(2) (kgfcm)				
2½Cr-1Mo	SMAW	CMA-106H	R.T.	591 (60.3)	700 (71.4)	21	180 (16)	690°F. x24 มม.			
			482	454 (46.3)	509 (51.9)	16					
	SAW	PF-500/ US-521H	R.T.	596 (60.3)	692 (70.6)	20	130 (13)	690°F. x24 มม.			
			482	473 (43.2)	522 (53.2)	16					
	GTAW	TGS-2CMH	R.T.	582 (59.3)	687 (70.1)	25	290 (290)	690°F. x28 มม.			
			482	469 (45.9)	505 (51.5)	17					
3Cr-1Mo	SMAW	CM-3H	R.T.	531 (54.1)	611 (57.4)	25	150 (15)	710°F. x28 มม.			
			468	430 (43.8)	489 (49.9)	16					
	SAW	PF-500/ S-531H	R.T.	505 (51.5)	629 (64.1)	25	200 (20)	710°F. x28 มม.			
			468	479 (42.7)	482 (49.1)	16					
	GTAW	TGS-3CMH	R.T.	589 (60.0)	705 (71.9)	27	290 (290)	710°F. x28 มม.			
			468	469 (47.9)	523 (53.4)	17					

หมายเหตุ (1) : ความยาวเกจ : เส้นผ่านศูนย์กลาง x 4 สำหรับทดสอบโดยดัดแบบโค้ง  
เส้นผ่านศูนย์กลาง x 5 สำหรับทดสอบโดยดัดแบบดึง

(2) : อุณหภูมิทดสอบ : -18° F.

(kgf/mm<sup>2</sup> = กก./แรง/มม.<sup>2</sup>, N/mm<sup>2</sup> = นิวตัน/มม.<sup>2</sup>, kgf-m = กก./แรง-ม.)



ตารางที่ 3.12 ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของลวดเชื่อมเหล็กกล้าชั้นสูง 9%Cr

สำหรับท่อไอน้ำรับอุณหภูมิและแรงดันสูง

ชนิดของเหล็ก	กรรมวิธี การเชื่อม	ลวดเชื่อม	ส่วนส่ผสมทางเคมีของโลหะรอยเชื่อม (%)										PMT (°C x Hr.)	Test Temp. (°C)	O.2%YS (kgf/cm <sup>2</sup> ) (kgf/cm <sup>2</sup> )	UTS (kgf/cm <sup>2</sup> )	EL (%)	0°C, IV (kgf-cm)
			C	SI	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	V	Ni						
Mod. 9Cr-1Mo (Super 9Cr) หรือ TEMPALLOY F-9	SAW	CH-9Cb	0.09	0.57	1.40	0.010	0.003	9.13	1.08	0.03	0.33	0.57	740x8	RT	65	77	23	6.0
														600	33	36	25	
	GTAW	TCS-9Cb	0.08	0.39	0.69	0.005	0.008	0.63	0.85	0.04	0.16	0.64	750x2	RT	67	76	25	22.0
														600	34	36	22	
HCM9H	SAW	CH-9H	0.11	0.40	0.81	0.008	0.003	9.01	2.04	-	-	0.69	715x10	RT	54	69	25	8.0
														600	32	35	24	
	GTAW	TCS-9H	0.10	0.43	0.77	0.008	0.005	9.03	2.00	-	-	-	715x10	RT	55	72	26	17.0
														600	29	34	22	
	SAW	US-9H / MF-26	0.11	0.18	1.02	0.009	0.003	9.04	2.05	-	-	-	715x10	RT	48	68	26	8.0
														600	28	32	28	

(kgf/mm<sup>2</sup> = กก. แรง./มม.<sup>2</sup>, kgf-m = กก. แรง.-ม.)

(C x hr. = ช. x ชม.)



ตารางที่ 3.14 แนวทางการเลือกวัสดุเชื่อมสำหรับการต่อโลหะต่างชนิดกัน (SMAW, GTAW)

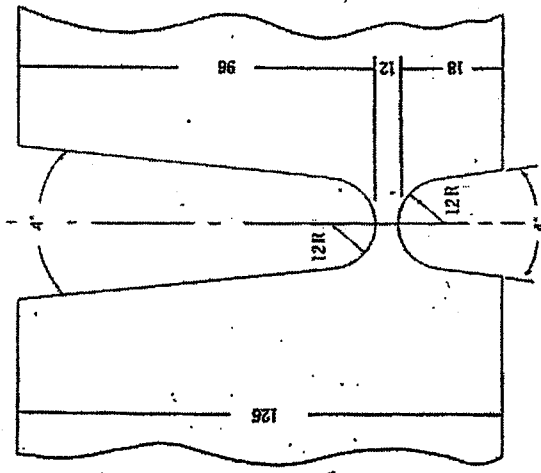
โลหะงาน	เหล็กงาน	0.5%Mo	1.25%Cr -0.5%Mo	2.25%Cr -1%Mo	5%Cr 0.5%Mo	9%Cr -1%Mo
(5) 304 Stainless steel	NC-39 TGS-309 NIC-703D TGS-70NCb	{ JIS D308-16, AMS E309-16 JIS Y309, AMS ER309 JIS D308-16, AMS ER308-Fe-3 JIS D308-16, AMS ER308-Fe-3 JIS D308-16, AMS ER308-Fe-3 }				
9%Cr -1%Mo	LB-52 TGS-50	CMA-76 TGS-M	CMA-96 TGS-1CM	CMA-108 TGS-2CM	CH-5 TGS-5CM	
5%Cr -0.5%Mo	LB-52 TGS-50	CMA-76 TGS-M	CMA-96 TGS-1CM	CMA-108 TGS-2CM		
2.25%Cr -1%Mo	LB-52 TGS-50	CMA-76 TGS-M	CMA-96 TGS-1CM			
1.25%Cr -0.5%Mo	LB-52 TGS-50	CMA-76 TGS-M				
0.5%Mo	LB-52 TGS-50					

\*

หมายเหตุ  
(5) แนวทางนี้ใช้ตาม AMS 9108-76 (แนะนำทำขึ้น  
สำหรับการเชื่อมต่อเหล็กโครเมียม-นิกเกิล-โมลิบดีนัม)  
ส่วนประกอบเหล่านี้อาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของ  
การใช้งาน

(4) สำหรับวัสดุเชื่อมเหล็กโครเมียมและเหล็ก Cr-Mo การให้รายละเอียด  
ของค่าเชื่อมควรทำตามที่ผู้ผลิตวัสดุเชื่อมกำหนดไว้  
เหล็กเชื่อมเหล่านี้ใช้สำหรับเชื่อมเหล็กโครเมียม-นิกเกิล-โมลิบดีนัม

(5) สำหรับการใช้งานเป็นวงกว้าง, สำหรับเชื่อมเหล็ก 304 หรือ 309 ควรใช้วัสดุเชื่อม  
ตามตารางนี้, ควรใช้วัสดุเชื่อม NIC-703D (สำหรับ DCEP) และ TGS-70NCb  
สำหรับการใช้งานเป็นวงกว้างกว่า 316 L, ควรใช้วัสดุเชื่อม NC-39 และ TGS-309  
เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ไม่สามารถเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อม  
เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 จะมีความทนทานต่อความเครียดต่ำกว่า



รูปที่ 3.27 ตัวอย่างของร่องงานเชื่อมสำหรับการเชื่อมอาร์คไฟฟ้า

ตารางที่ 3.15 ข้อเสนอแนะทั่วไปของอัตราการไหลของก๊าซคลุม

กรรมวิธี การเชื่อม	อัตราการไหลของ ก๊าซคลุม (ลิตร/นาที)	ระยะห่าง ของหัวฉีด (มม.)	ความเร็วของลมที่จำกัด (ม./วินาที)
GMAW	20-25	20	2 max.
GTAW	10-15	-	1 max.

Max. = สูงสุด

ตารางที่ 3.16 ข้อเสนอแนะทั่วไปของอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนเชื่อมและระหว่างเปลี่ยนเทียวยเชื่อม

ชนิดของเหล็ก	อุณหภูมิก่อนเชื่อมและ ระหว่างเปลี่ยนเทียวย (°ซ.)
C-0.5Mo	100-200
1-1.25Cr-0.5Mo	150-300
2.25Cr-1Mo	200-350
3Cr-1Mo	200-350
5Cr-0.5Mo	250-350
7Cr-0.5Mo	250-350
9Cr-1Mo	250-400
Mn-Mo-Ni	150-250

ตารางที่ 3.17 อุณหภูมิให้ความร้อนหลังการเชื่อมตามมาตรฐานต่างๆ

P	ชนิดของเหล็ก	HPIS/ WES	JIS I Z 3700	ISO TC 11	IIW X-WG	ASME <sup>1)</sup> Sec. VIII	ASME <sup>2)</sup> Sec. III	BS 5500	BS 2633	ANSI B31.3
P 1	เหล็กคาร์บอน	≥ 550	≥ 600	550~600	540~580	≥ 593	593~677	600±20	580~620 630~670 <sup>3)</sup>	595~650
	เหล็กกล้าแรงดึงสูง	≥ 550	≥ 600		(≥ 580) <sup>3)</sup>					
P 3	เหล็ก C-Mn	≥ 580	≥ 600	580~620		≥ 593	593~677	650~680	650~680	595~720
P 4	เหล็ก 1Cr-0.5 Mo	≥ 590 <sup>4)</sup> ≥ 620	≥ 680	620~680		≥ 593	593~677	630~670 <sup>5)</sup> 650~700	630~670	705~745
P 5	เหล็ก 2.25Cr-1Mo	≥ 650 <sup>4)</sup> ≥ 675	≥ 680	625~750 <sup>6)</sup>				630~670 <sup>5)</sup> 680~720 710~750	680~720 <sup>6)</sup> 700~750	705~760
	เหล็ก 5Cr-0.5 Mo	≥ 675 <sup>4)</sup>		670~740 <sup>6)</sup>				5Cr-1Mo 710~760	710~760	
	เหล็ก 9Cr-1 Mo	≥ 700								
P 9 B	เหล็ก 3.5 Ni	≥ 550		550~580		≥ 593	593~677	580~620	590~620	595~635

หมายเหตุ (1) อุณหภูมิที่ต่ำกว่าสามารถถูกนำมาใช้ได้โดยกำหนดให้เวลาการรักษาคูลดให้มีค่าเท่ากัน

(2) เมื่อเหล็กกล้ามีธาตุเจือ เช่น Cr, Mo เป็นต้น ซึ่งทำให้เหล็กมีความแข็งแรงเพื่อ

เพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น

(3) ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขหรือสภาวะแวดล้อมในการใช้งาน หรือการออกแบบความแข็งแรง

(4) ช่วงอุณหภูมิของ 400° ถูกกำหนดในการใช้งานต่างๆ

(5) เมื่อปริมาตรคาร์บอนมีมากกว่า 0.25%

## บทที่ 4

### การเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

### (Welding of High Strength Steels)

#### 4.1 ชนิดและลักษณะที่สำคัญของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

(Type and features of high strength steels)

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงถูกใช้สำหรับเรือขนาดใหญ่, สะพาน, ตึกสูง, ถังรับแรงดันสูง, หัวเจาะ, ลูกรีด เป็นต้น เพื่อให้ได้ความแข็งแรงในการออกแบบสูงขึ้นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงมีความแข็งแรงทางแรงดึงและความแข็งแรงจุดครากที่สูงขึ้นด้วยอัตราส่วนของยิลด์ (yield ratio) หรืออัตราส่วนของความแข็งแรงจุดครากต่อความแข็งแรงทางแรงดึงมีมากกว่าของเหล็กถนุมนดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 นั่นก็คือความแข็งแรงสูงจะมีความแข็งแรงจุดคราก = 30 กก. แรง/ม<sup>2</sup> และความแข็งแรงทางแรงดึง = 50 กก.แรง/ม<sup>2</sup> เป็นค่าต่ำสุด

ผลดีของการออกแบบความแข็งแรงได้สูงขึ้นคือ (1) ออกแบบโครงสร้างของเหล็กกล้าได้ขนาดใหญ่ขึ้น, (2) ออกแบบโครงสร้างของเหล็กกล้าได้เบาลง (3) ทำให้มีความสามารถทนทานความเค้นได้เพิ่มมากขึ้นสำหรับโครงสร้างเหล็กกล้า ตารางที่ 4.1 แสดงความสามารถในการทำเหล็กกล้าโครงสร้างได้เบามากขึ้นโดยการใช้เหล็กกล้าทนแรงดึงสูง ตัวอย่าง เช่น เหล็กกล้า HT.50 สามารถใช้น้ำหนักโครงสร้างเหล็กกล้า ตารางที่ 4.1 แสดงความสามารถในการทำเหล็กกล้าโครงสร้างได้เบามากขึ้นโดยการใช้เหล็กกล้าทนแรงดึงสูง ตัวอย่าง เช่น เหล็กกล้า HT.50 สามารถใช้น้ำหนักโครงสร้างน้อยลงถึง 25% ของเหล็กถนุมนโดยที่ความเค้นการออกแบบยังเท่าเดิม อัตราส่วนของน้ำหนักในตารางที่ 4.1 คำนวณได้ดังนี้คือ

ความแข็งแรงจุดครากต่ำสุดของ SM.41

$$\text{อัตราส่วนของน้ำหนัก} = \frac{\text{ความแข็งแรงจุดครากต่ำสุดของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง}}{\text{ความแข็งแรงจุดครากต่ำสุดของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง}}$$

ในการผลิตเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ธาตุเจือชนิดต่าง ๆ (C, Mn, Ni, Cr, Mo, V, Nb, Cu, Ti, B, etc.) จะถูกเติมเข้าไป และธาตุบางตัวจะถูกอบให้ความร้อนเพื่อที่จะทำให้เหล็กกล้ามีความแข็งแรงจุดครากสูง, ความแข็งแรงทางดึงสูง และมีความเหนียวสูง เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงสามารถแบ่งได้เป็นชนิดต่าง ๆ คือ 50, 60, 70, 80, และ 100 กก.แรง/ม<sup>2</sup> โดยแบ่งตามความแข็งแรงทางแรงดึง อย่างไรก็ตามบางมาตรฐานแบ่งชนิดของเหล็กกล้าตามความแข็งแรงจุดคราก

ที่ 4.2 แสดงมาตรฐานของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่แบ่งโดยความแข็งแรงทางแรงดึง กำหนดโดย JIS ตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 แสดงมาตรฐานของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่แบ่งโดยความแข็งแรงจุดคราก กำหนดโดย J.W.E.S (The Japan Welding Engineering Society) และ API (American Petroleum Institute)

เมื่อดูตามกรรมวิธีการผลิต เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงจะแบ่งออกเป็นชนิดปรับสภาพโดยใช้ความร้อน (thermal refining) และชนิดปรับสภาพโดยไม่ใช้ความร้อน (non-thermal refining) เหล็กกล้าชนิดปรับสภาพโดยใช้ความร้อนจะถูกชุบแข็งและอบคืนหลังจากผ่านกรรมวิธีการรีด ส่วนเหล็กกล้าชนิดปรับสภาพโดยไม่ใช้ความร้อนจะรวมถึงเหล็กกล้าผ่านการรีด, ผ่านการรีดและอบคืนตัว, ผ่านการทำอมาลไธซ์, และผ่านการนอมัลไลซ์กับการอบคืนตัว โดยทั่ว ๆ ไปเหล็กกล้าที่มีค่าความแข็งแรงทางแรงดึงน้อยกว่า 60 กก. แรง/ม<sup>2</sup> จะเป็นชนิดปรับสภาพโดยไม่ใช้ความร้อน ส่วนเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงทางแรงดึงมากกว่า 60 กก.แรง/ม<sup>2</sup> จะเป็นชนิดปรับสภาพโดยใช้ความร้อน ข้อดีและข้อเสียของชนิดปรับสภาพโดยใช้ความร้อนกับชนิดปรับสภาพโดยไม่ใช้ความร้อน มีดังต่อไปนี้

(1) ชนิดปรับสภาพโดยไม่ใช้ความร้อน

- (a) ง่ายต่อการผลิตชิ้นงานที่มีขนาดต่าง ๆ กัน
- (b) การขึ้นรูปร้อนสามารถกระทำได้
- (c) ยากต่อการทำให้เป็นที่พอใจเกี่ยวกับความแข็งแรงทางดึง, ความเหนียว รอยบาก และความสามารถในการต้านทานการแตกร้าว ในเวลาเดียวกันกับความหนาของแผ่นชิ้นงานและความแข็งแรงทางแรงดึงเพิ่มขึ้น

(2) ชนิดปรับสภาพโดยใช้ความร้อน

- (a) มีความเหนียวรอยบาก, ความสามารถในการต้านทานการแตกร้าว และความแข็งแรงสูงขึ้น ด้วยปริมาณเพียงเล็กน้อยของธาตุเจือ
- (b) บริเวณกระทบร้อนทนทานความร้อนเข้าได้น้อยลงซึ่งเป็นผลเสียต่อความแข็งแรงทางแรงดึง และความเหนียวรอยบาก
- (c) การขึ้นรูปร้อนเป็นผลเสียต่อความแข็งแรงทางแรงดึงและความเหนียว รอยบาก
- (d) ในการให้ความร้อนหลังการเชื่อมเพื่อกำจัดการบิดตัวจากการเชื่อม และความเค้นตกค้าง ควรจะจำกัดอุณหภูมิการให้ความร้อนเพื่อที่จะป้องกันการลดลงของความแข็งแรงทางแรงดึงและความเหนียวรอยบากของงานเชื่อม

นอกจากชนิดปรับสภาพโดยไม่ใช้ความร้อนและใช้ความร้อนแล้ว ก็ยังมีชนิดควบคุมความร้อนเชิงกลด้วย กรรมวิธีควบคุมความร้อนเชิงกลทำให้เราสามารถเพิ่มสมบัติทางกลและความสามารถในการเชื่อมของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ในกรรมวิธีการผลิตเหล็กกล้าชั้นสูงนี้ เหล็กกล้าจะถูกกระทำภายใต้การถูกควบคุมอย่างคงที่ในลำดับการเย็นตัวของคาร์ดและหลังการรีด

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงมีโครงสร้างจุลภาคหลาย ๆ แบบโดยขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี, ความหนาของแผ่นชิ้นงานและการกระทำทางความร้อน โครงสร้างจุลภาคเหล่านี้มีหลายรูปแบบคือ ส่วนผสมของเฟอร์ไรท์-เฟลไรท์, ส่วนผสมของเฟอร์ไรท์-เบนไนท์, เบนไนท์, ส่วนผสมของเบนไนท์-มาร์เทนไซต์, และมาร์เทนไซต์ ตารางที่ 4.5 จะบอกโครงสร้างของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงหลาย ๆ ชนิด

การปรับสภาพโดยใช้ความร้อนหมายถึง การชุบแข็ง (quenching) และการอบคืนตัว (tempering) แม้ว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่ผ่านการชุบแข็งและการอบคืนตัวมาแล้วทำให้มีความเหนียวรอยบากดีขึ้นเนื่องจาก โครงสร้างจุลภาคที่ละเอียด ความแข็งแรงจุดครากก็สูงขึ้นและอัตราส่วนของยิลด์สามารถถึง 0.90 แต่เมื่อจะทำการออกแบบความเค้นอนุญาตของโครงสร้างงานเชื่อม อัตราส่วนของยิลด์ที่สูงขึ้นนี้อาจจะต้องนำมาพิจารณาด้วยเพราะว่าโดยทั่วไปอัตราของยิลด์ที่สูงขึ้นเป็นผลทำให้การยึดตัวของเหล็กกล้านี้ลดลง

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่สุดถูกใช้สำหรับงานก่อสร้างทั่ว ๆ ไป, งานที่ป้องกันสภาวะอากาศ, งานที่ต้านทานการกัดกร่อน, งานที่ป้องกันการสึกหรอ และการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ในหนังสือนี้จะอธิบายสำหรับงานก่อสร้างโดยทั่ว ๆ ไป

## 4.2 ความสามารถในการเชื่อมของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงในการเชื่อมแบบหลอมละลาย

(Weldability of high strength steels in fusion welding)

ความสามารถในการเชื่อมสามารถอธิบายได้ว่าเป็นความง่ายของการเชื่อมเพื่อที่จะได้ผลออกมา เป็นที่น่าพอใจ ผลที่น่าพอใจควรจะรวมถึงความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมที่สามารถใช้ได้ ค่าใช้จ่ายในการเชื่อม, สมบัติของรอยเชื่อมที่ได้ตามความต้องการที่ระบุไว้ในการใช้งาน รอยเชื่อมที่สมบูรณ์ไม่ควรมีสิ่งบกพร่อง เช่น การแตกร้าวร้อนและเย็น, การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ เป็นต้น



#### 4.2.1 การแข็งตัวของบริเวณกระทบร้อน

(Hardening of heat affected zone)

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงจะมีธาตุเจือต่าง ๆ ในปริมาณที่มากกว่าในเหล็กกล้าธรรมดา บริเวณกระทบร้อนของโลหะชิ้นงานจะถูกทำให้แข็งโดยเป็นผลมาจากวัฏจักรของความร้อน เข้ารูปที่ 4.2 แสดงเส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง (Continuous Cooling Transformation Curve) ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 60 กก.แรง/มม<sup>2</sup> เส้นโค้งนี้จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัวจากช่วงออสเทนไนต์กับความแข็งแรงของเหล็กกล้านี้ จากภาพจะแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการเย็นตัวที่สูงขึ้น โครงสร้างจุลภาคจะมีเปอร์เซ็นต์ของมาร์เทนไซต์ที่สูงและค่าความแข็งก็สูงขึ้น รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์เพิ่มขึ้นในรายละเอียด

การแข็งตัวของบริเวณกระทบร้อนนี้ก็มีผลมาจากคาร์บอนที่ละลายในโลหะชิ้นงานด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่ออัตราการเย็นตัวมีค่าคงที่ จากภาพแสดงความแข็งแรงสูงสุดของบริเวณกระทบร้อนจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อคาร์บอนที่ละลายเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงสูงสุดของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิด 60 กก.แรง/มม<sup>2</sup> อาจจะสูงถึง 420 Hv ในบริเวณกระทบร้อนของการเชื่อม แม้ว่า บริเวณไม่กระทบร้อนของมันอาจจะต่ำเพียงแค่ 240 Hv

#### 4.2.2 การแตกร้าวในงานเชื่อม (Weld cracks)

##### 4.2.2.1 ชนิดและสมบัติที่สำคัญของการแตกร้าว

(Type and features of cracks)

สิ่งบกพร่องที่ไม่ดีที่สุดอย่างหนึ่งของงานเชื่อมก็คือการแตกร้าว รอยแตกร้าวในงานเชื่อมมีหลายชนิดและหลายลักษณะตามตำแหน่งที่ตั้งและอุณหภูมิของการเกิด ตารางที่ 4.6 แสดงชนิดและลักษณะที่สำคัญของรอยแตกร้าวในงานเชื่อมโดยทั่วไปที่มีแนวโน้มจะเกิดขึ้นในการเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

การแตกร้าวเย็น (cold crack) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200°C ความสามารถในการอ่อนตัวไม่เพียงพอของรอยเชื่อมเนื่องจากการแข็งตัว, การแทรกตัวของไฮโดรเจน และความเค้นกักตัว เป็นสาเหตุหลัก ๆ 3 อย่าง

การแตกร้าวร้อน (hot crack) ในโลหะรอยเชื่อมและบริเวณกระทบร้อนที่อุณหภูมิสูงใกล้ ๆ กับจุดแข็งตัว เมื่อความสามารถในการอ่อนตัวของรอยเชื่อมไม่เหมาะสมกับความเค้นที่เพิ่มขึ้นโดยการหดตัวของรอยเชื่อมในระหว่างการแข็งตัว ถึงแปลกลบที่มีจุดหลอมละลายต่ำ เช่น ซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัส ถูกพิจารณาว่าเป็นตัวเร่งให้การแตกร้าวเกิดขึ้น

นอกจากการแตกร้าวร้อนและการแตกร้าวเย็นแล้ว ก็ยังมีการแตกร้าวจากการให้ความร้อนซ้ำ (SR cracking) , การแตกร้าวจากความเค้นกักคร่อน และการแตกร้าวจากการล้าที่อาจมีโอกาสดังขึ้นในรอยเชื่อม

#### 4.2.2.2 ความไวในการแตกร้าว

(Crack sensitivity)

ในการทดสอบความไวในการแตกร้าว บางวิธีเป็นของการเชื่อมต่อน และในบางวิธีก็เป็นของการเชื่อมต่อนาก (fillet welding) บางวิธีเหมาะสมสำหรับการทดสอบความไวในการแตกร้าวร้อน บางวิธีเหมาะกับการแตกร้าวเย็น ตารางที่ 4.7 จะบอกกรรมวิธีต่าง ๆ ในการทดสอบความไวในการแตกร้าวชนิดต่าง ๆ ที่กำหนดโดย JIS

รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบความไวในการแตกร้าวของรอยเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิด 80 กก.แรง/ม<sup>2</sup> ทดสอบโดยใช้แบบร่องตัววาย (y-groove) ภายใต้อุณหภูมิการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม ต่ำสุดที่จำเป็นในการป้องกันการแตกร้าวคือ 150°C.

ไม่เป็นการง่ายนักที่จะประมาณความไวในการแตกร้าวของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเพียงแค่อ้างอิงถึงความแข็งแรงของบริเวณกระแทกร้อน หรือค่าคาร์บอนเทียบเท่า สำหรับการประมาณค่าความไวในการแตกร้าว ตามสูตรที่ให้ไว้ข้างล่างนี้ก็สามารถใช้ได้ ซึ่งมาจากผลของการทดสอบการแตกร้าวด้วยร่องตัววาย

$$Pc = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/20 + V/10 + 5B + t/600 + H/60$$

ในเมื่อ :- Pc	=	พารามิเตอร์การแตกร้าว
t	=	ความหนาของแผ่นชิ้นงาน (มม.)
H	=	ปริมาณไฮโดรเจนที่ออกมาจากโลหะรอยเชื่อม (มล./100 กรัม)

จากการพิจารณาพารามิเตอร์การแตกร้าว (Pc) อุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมที่จำเป็นสำหรับการป้องกันการแตกร้าวสามารถหาได้จากรูปที่ 4.6 หรือจากสูตรข้างล่างนี้

$$T = 1400 \times Pc - 392$$

ในเมื่อ :- T = อุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนเชื่อมเพื่อป้องกันการแตกร้าวรอยเชื่อม

### 4.2.3 การแทรกตัวได้ของไฮโดรเจน

(Diffusible hydrogen)

ไฮโดรเจนจะถูกดูดซับเข้าไปได้ง่ายในระหว่างการเชื่อมเหล็กกล้าแหล่งของไฮโดรเจนเริ่มแรกในการเชื่อมก็คือ ความชื้นในอากาศ, วัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลือง, และบนผิวหน้าของโลหะชิ้นงาน

เป็นที่รู้กันว่าไฮโดรเจนที่ถูกดูดซับเข้าไปในรอยเชื่อมจะแพร่แทรกตัวเข้าไปในรอยเชื่อมและบริเวณกระทบร้อนของโลหะชิ้นงาน การแทรกตัวของไฮโดรเจนนี้อาจจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดโพรงก๊าซและการแตกร้าว การแตกร้าวเนื่องจากไฮโดรเจนนี้พูดได้ว่าที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับผลการรวมตัวของไฮโดรเจนที่ละลายตัวในโลหะรอยเชื่อม, อัตราการเย็นตัวของรอยเชื่อม, ส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อมและความเค้นในรอยเชื่อม ปริมาณไฮโดรเจนที่แทรกตัวในโลหะรอยเชื่อมจะแปรเปลี่ยนตามความดันไอน้ำของอากาศตามที่แสดงในรูปที่ 4.7 รูปนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกตัวของไฮโดรเจนของโลหะรอยเชื่อมด้วยอิเล็กโตรดชนิดไฮโดรเจนต่ำสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิด 60 กก.แรง/มม<sup>2</sup> และความดันไอน้ำของอากาศเกี่ยวกับปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในฟลักซ์หุ้มอิเล็กโตรด

ในการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุม ความดันไอน้ำของอากาศเกือบจะไม่มีผลต่อปริมาณการแทรกตัวของไฮโดรเจนในโลหะรอยเชื่อม เพราะว่าการอาร์คถูกปกคลุมไว้ด้วยผงฟลักซ์ อย่างไรก็ตาม ความชื้นที่ดูดซับไว้ในฟลักซ์ก็ยังมีผลต่อการแทรกตัวของไฮโดรเจนในโลหะรอยเชื่อม

การแทรกตัวของไฮโดรเจนมีผลเสียต่อความสามารถในการเชื่อมตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นผู้ผลิตวัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองจึงพัฒนาอิเล็กโตรดหุ้มฟลักซ์ชนิดไฮโดรเจนต่ำ, ต่ำมากพิเศษ และต่ำสุดร้าว ก็เพื่อที่จะลดการแทรกตัวของไฮโดรเจน ตารางที่ 4.8 จะให้ค่าโดยทั่วไปของการแทรกตัวของไฮโดรเจนของอิเล็กโตรดหุ้มฟลักซ์พวกนี้

อย่างไรก็ตาม การแทรกตัวของไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออิเล็กโตรดหุ้มฟลักซ์ดูดซับความชื้นไว้ รูปที่ 4.8 เป็นผลการทดสอบการดูดซับความชื้นของอิเล็กโตรดหุ้มฟลักซ์ชนิดไฮโดรเจนต่ำสุดร้าว ด้วยสารพอกหุ้มที่ต่างกันสองชนิด (ชนิดหนึ่งเป็นแบบธรรมดา ส่วนอีกชนิดหนึ่งเป็นชนิดต้านทานความชื้น) โดยวางไว้ในที่อุณหภูมิและบรรยากาศความชื้นคงที่ จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาที่วางผึ่งไว้ยาวนานขึ้น อิเล็กโตรดทั้งสองชนิดก็จะดูดซับความชื้นได้มากขึ้น และสารพอกหุ้มชนิดต้านทานความชื้นจะดูดซับความชื้นน้อยกว่าแบบชนิดธรรมดา

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการวางผึ่งไว้ และการแทรกตัวของไฮโดรเจนของโลหะรอยเชื่อมทั้งสองชนิดที่กล่าวถึงข้างต้น จากรูปแสดงให้เห็นชนิดต้านทาน

ความชื้นสามารถทำให้มีการแทรกตัวของไฮโดรเจนต่ำกว่าชนิดธรรมดา ชนิดที่ต่ำกว่าในการแทรกตัวของไฮโดรเจนและวิธีดำเนินการในการแตกร้าถูกแนะนำไว้ในรูปที่ 4.6

#### 4.3 วิธีการเชื่อมและวิธีดำเนินการในการเชื่อม

##### (Welding processes and procedures)

เพื่อที่จะได้ผลของการเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเป็นที่น่าพอใจ ก็จะต้องเลือกใช้วัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองให้เหมาะสมและกรรมวิธีการเชื่อมและวิธีดำเนินการในการเชื่อมที่ถูกต้องก็ต้องนำมาใช้ด้วย ในตารางที่ 4.9 แสดงเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ชนิด 50 ถึง 80 กก.แรง/ม<sup>2</sup> ถูกเชื่อมโดยการเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค (SMAW) , การเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุม (SAW), การเชื่อมอาร์คก๊าซคลุม (GMAW) และการเชื่อมอาร์คทั้งสเดน (GTAW)

##### 4.3.1 การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค

##### (Shielded metal arc welding)

##### 4.3.1.1 ชนิดและลักษณะที่สำคัญของอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์

##### (Types and features of covered electrodes)

ต่อไปนี้เป็นสิ่งจำเป็นทั่ว ๆ ไปของอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

- (a) สมบัติทางกล (ความแข็งแรงทางแรงดึง, ความสามารถในการอ่อนตัว, ความเหนียวรอยบาก เป็นต้น ของโลหะรอยเชื่อมจะต้องดีพอตามข้อกำหนดรายละเอียด
- (b) ความไวต่อการแตกร้าของรอยเชื่อมต้องต่ำมากพอที่จะป้องกันการแตกร้า
- (c) ความสามารถในการทำงานต้องดีพอเพียงที่จะทำให้ได้การเชื่อมที่สมบูรณ์และมีประสิทธิภาพ

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ใช้สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิด 50-80 กก.แรง/มม<sup>2</sup> มีอยู่หลายชนิด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.10 แม้ว่าอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ชนิดอิลมินไนท์ (ilmenite) และชนิดไลม์-ไททาเนีย (lime-titania) จะถูกระบุให้ใช้กับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิด 50 กก.แรง/มม<sup>2</sup> แต่อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ชนิดไฮโดรเจนต่ำก็ยังถูกใช้กันทั่วไป สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเพื่อผลดีของความสามารถในการเชื่อมที่ดีกว่า

ในกรณีของมาตรฐาน AWS, A5.1 "Carbon Steel Covered Arc Welding Electrodes" จะใช้สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิด 50 กก.แรง/มม<sup>2</sup> ส่วน AWS, A5.5 "Low Alloy Steel Covered Arc Welding Electrodes" จะใช้กับเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูงมากขึ้น

นอกจากอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ชนิดไฮโดรเจนต่ำแบบธรรมดาแล้วก็ยังมียิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ชั้นสูงดังต่อไปนี้ ซึ่งกำลังเป็นที่นิยมใช้กันมาก

- a) ชนิดต้านทานความชื้น (moisire-resistant type)
- b) ชนิดไฮโดรเจนพิเศษ (extra-low hydrogen type)
- c) ชนิดไฮโดรเจนต่ำสุดร่ำ (ultra-low hydrogen type)
- d) ชนิดควันพิษน้อย (less-fume type)

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ซึ่งมีความต้านทานการดูดซับความชื้นได้ดีกว่าจะถูกเรียกว่าชนิดต้านทานความชื้น ข้อดีของชนิดนี้กล่าวไว้ในข้อ 4.3.3.3 อุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนเชื่อมสามารถทำให้ต่ำลงได้โดยการใช้อิเล็กโทรดชนิดนี้ เพราะว่าการแทรกตัวของไฮโดรเจนมีน้อยแม้ว่าอิเล็กโทรดจะถูกวางทิ้งไว้ในบรรยากาศที่มีความชื้นนับเป็นชั่วโมงก็ตาม

ปริมาณการแทรกตัวของไฮโดรเจนในโลหะรอยเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำจะอยู่ในช่วง 3-5 มล./100 กรัม เพราะชนิดไฮโดรเจนต่ำสุดร่ำ อยู่ในช่วง 0.5-1.5 กก./กรัม ตามที่แสดงในตารางที่ 4.11 อิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำสุดร่ำจะมีความต้านทานการแตกร้าวที่ตีมากกว่าชนิดไฮโดรเจนต่ำพิเศษ

ควันพิษในการเชื่อมเป็นอันตรายต่อช่างเชื่อม ดังนั้นเพื่อป้องกันอันตรายที่มีสาเหตุจากควันพิษในโรงงานเชื่อมจึงควรมีการถ่ายเทอากาศ และช่างเชื่อมควรจะสวมหน้ากากป้องกันเพื่อที่จะให้เกิดอันตรายจากควันพิษน้อยที่สุดจึงมีการผลิตอิเล็กโทรดชนิดแพร่ควันพิษน้อยคือชนิด D516 และ D5000 ซึ่งอัตราการแพร่ควันพิษจะน้อยกว่าอิเล็กโทรดธรรมดา 25-40%

#### 4.3.1.2 การเลือกใช้อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์

(Selection of covered electrodes)

ในการเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง บางรอยต่อก็ถูกประกอบด้วยเหล็กกล้าชนิดเดียวกัน และบางทีก็เป็นเหล็กกล้าต่างชนิดกันที่มีความแข็งแรงแตกต่างกัน ในการเชื่อมต่อเหล็กกล้าที่เหมือนกัน อิเล็กโทรดที่เลือกใช้ควรจะให้เหมือนกันมากที่สุดกับโลหะชิ้นงานด้านสมบัติทางกลและส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ส่วนในการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันอิเล็กโทรดต้องเพื่อให้เข้ากันได้ทั้งโลหะชิ้นงานที่มีความแข็งแรงทางแรงดึงสูงกว่า หรือโลหะชิ้นงานที่มีความแข็งแรงทางแรงดึงต่ำกว่า แต่โดยทั่วไป เนื่องจากความไวในการแตกร้าวและความสามารถในการเชื่อมที่ดีกว่า อิเล็กโทรดที่เข้ากันกับโลหะชิ้นงานที่มีความแข็งแรงทางแรงดึงต่ำกว่าจะถูกเลือกใช้ การเลือกอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์โดยทั่วไปสำหรับการเชื่อมต่อเหล็กกล้าต่างชนิดกัน แสดงอยู่ในตารางที่ 4.12

### 4.3.1.3 ข้อความจำในวิธีดำเนินการในการเชื่อม

(Notes on welding procedure)

#### a) การอบแห้งอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์

(Drying of covered electrodes)

ไฮโดรเจนที่มีอยู่ในโลหะรอยเชื่อมส่วนใหญ่จะมาจากวัสดุที่พอกหุ้มและความชื้นที่ถูกดูดซับไว้ เมื่อปริมาณการดูดซับความชื้นเพิ่มมากขึ้น ก็จะทำให้ปริมาณของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นด้วย ไฮโดรเจนนี้สามารถเป็นสาเหตุให้เกิดสิ่งบกพร่องในงานเชื่อมได้เช่นการแตกร้าวและโพรงก๊าซ ดังนั้นอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์จึงต้องเก็บรักษาในที่แห้งเพื่อที่จะให้มีความชื้นน้อยที่สุด และอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ควรจะอบแห้งในเตาอบก่อนที่จะใช้งาน

เงื่อนไขในการอบแห้งทั่ว ๆ ไปสำหรับอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 4.13 การอบแห้งก่อนการใช้งานถูกกระทำเป็นเวลา 1 ชม. ที่  $300 - 350^{\circ}\text{C}$  สำหรับอิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำที่ใช้ สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิด 50 กก.แรง/ม<sup>2</sup> และที่  $350 - 400^{\circ}\text{C}$  สำหรับอิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำ และชนิดไฮโดรเจนต่ำอุลตรา อย่างไรก็ตามควรจำไว้ด้วยว่าเงื่อนไขในการอบแห้งอาจจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแต่ละสินค้าหรือยี่ห้อของอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ ดังนั้นการอบแห้งต้องกระทำตามข้อบ่งชี้ของผู้ผลิตวัสดุงานเชื่อม ดังนั้นการอบแห้งที่ถูกดูดซับไว้ไม่สามารถที่จะกำจัดออกได้อย่างพอเพียง ถ้าอุณหภูมิการอบแห้งและเวลาการอบแห้งไม่เพียงพอ

#### b) การให้ความร้อนก่อนการเชื่อม

(Preheating)

โดยการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม อัตราการเย็นตัวในการเชื่อมก็จะลดลง ดังนั้นการแข็งตัวของรอยเชื่อมก็จะลดลงด้วย การแทรกตัวของไฮโดรเจนที่ละลายตัวก็จะถูกร่ง และการแตกร้าวก็จะถูกหลีกเลี่ยงไป อุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมควรจะสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุเจือในเหล็กกล้า, การแทรกตัวของไฮโดรเจนในโลหะรอยเชื่อม และความหนาของแผ่นชิ้นงานตามที่ได้อธิบายไว้แล้วในข้อ 4.2.3.2 อุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมที่นำไปใช้งานในภาคปฏิบัติ ถูกแสดงในตารางที่ 4.14

#### c) เงื่อนไขในการเชื่อมและสมบัติทางกล

(Welding conditions and mechanical properties)

สมบัติทางกลของโลหะรอยเชื่อมจะเปลี่ยนแปลงเมื่อเงื่อนไขต่าง ๆ ในการเชื่อม (กระแสไฟ, แรงดัน และความเร็ว) ความหนาของแผ่นชิ้นงาน และอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนการเปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนเข้าและสมบัติทางกลของโลหะรอย

รอยเชื่อม ถูกแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นผลการทดสอบเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิด 80 กก.แรง/มม<sup>2</sup> ภาพนี้จะแสดงความแข็งแรงทางแรงดึงและความเหนียวจะต่ำลงเมื่อความร้อนเข้าเพิ่มสูงขึ้น

#### d) PWHT และสมบัติทางกล

(PWHT and mechanical properties)

การให้ความร้อนหลังการเชื่อม (PWHT) ถูกใช้เพื่อที่จะกำจัดความเค้นตกค้างหลังจากการเชื่อมแล้ว โดยทั่ว ๆ ไป PWHT จะลดความแข็งแรงทางแรงดึงลงผลของ PWHT ต่อความเหนียวรอยบากของรอยเชื่อมโดยมากแล้วจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของมัน ความเหนียวรอยบากของรอยเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิด 50 กก.แรง/มม<sup>2</sup> จะถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยใช้ PWHT อย่างไรก็ตาม ความเหนียวรอยบากของรอยเชื่อมเหล็กกล้าชนิด 60 กก.แรง/มม<sup>2</sup> และสูงกว่านี้จะลดต่ำลงโดยการทำให้ PWHT เพราะว่าเกิดความเปราะ SR รูปที่ 4.12 แสดงผลของการทำให้ PWHT ต่อความแข็งแรงทางแรงดึงของโลหะรอยเชื่อมด้วยระดับความแข็งแรงดึงที่ต่างกันสามระดับ จากภาพแสดงให้เห็นว่าเมื่อพารามิเตอร์ของการอบคืนตัว ( $P = T(20 + \log t)$ ) เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงทางแรงดึงจะค่อย ๆ ลดลง ดังนั้นอุณหภูมิ PWHT และเวลาการให้ความร้อนจึงต้องพิจารณาก่อนจะปฏิบัติเพื่อให้ได้ผลดีสำหรับความต้องการสมบัติทางกล

#### 4.3.2 การเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุม

(Submerged arc welding)

##### 4.3.2.1 ชนิดและลักษณะที่สำคัญของเส้นลวดเชื่อมและฟลักซ์

(Types and features of welding wires and fluxes)

การเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุมต้องการใช้เส้นลวดเชื่อมและฟลักซ์ เนื่องจาก การเชื่อมอาร์คคลุมนี้ใช้กระแสไฟเชื่อมสูง ทำให้การซึมลึกของรอยเชื่อมจึงลึกมาก อีกทั้ง ส่วนผสมทางเคมีของโลหะรอยเชื่อมก็จะมีผลอย่างมากโดยการเจือจาง (dilution) จากโลหะ ขึ้นงาน ดังนั้นการผสมกันอย่างเหมาะสมของเส้นลวดเชื่อมและฟลักซ์จึงควรถูกพิจารณาให้ ถูกต้องหลังจากทดลองการปฏิบัติงานของมันกับโลหะขึ้นงานที่จะใช้งาน มาตรฐานสำหรับวัสดุ งานเชื่อมสัณเปลืองสำหรับการเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คจะบอกรายละเอียดทั้งเส้นลวดเชื่อม และฟลักซ์ ตารางที่ 4.15 แสดงการแบ่งประเภทของเส้นลวดเชื่อมที่กำหนดโดย JIS Z3351 (Submerged Arc Welding Wires for Carbon Steel and Low Alloy Steel) ตารางที่ 4.16 แสดงการ แบ่งประเภทของ ฟลักซ์กำหนดโดย JIS Z 3352 (Submerged Arc Welding Fluxes for Carbon Steel and Low Alloy Steel) ตารางที่ 4.17 แสดงการแบ่งประเภทของฟลักซ์กำหนดโดย JIS Z 3352 (Submerged Arc Welding Fluxes for Carbon Steel and Low Alloy Steel) ตารางที่ 4.9 แสดงการแบ่งประเภทคุณภาพของเนื้อโลหะเดิมที่ได้จากการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุมจากการผสม

กันของเส้นลวดเชื่อมและฟลักซ์ ซึ่งกำหนดรายละเอียดโดย JIS Z 3183 (Quality Classification and Test Method of Submerged Arc Deposited Metal for Carbon Steel and Low Alloy Steel) มาตรฐานเหล่านี้รวมถึงของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วย

ในอีกนัยหนึ่ง สมาคมการเชื่อมแห่งอเมริกา (AWS) ก็ได้กำหนด AWS A 5.7 (Carbon Steel Electrodes and Fluxes for Submerged Arc Welding) และ AWS A 5.23 (Specification for Low Alloy Steel Electrodes and Fluxes for Submerged Arc Welding) สำหรับเส้นลวดเชื่อมและฟลักซ์สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

#### 4.3.2.2 การเลือกเส้นลวดเชื่อมและฟลักซ์

(Selection of welding wires and fluxes)

กฎทั่วไปสำหรับการเลือกวัสดุงานเชื่อมขึ้นเปลี่ยนให้เหมาะสำหรับการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุมของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง จะเหมือนกับการเลือกอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ให้เหมาะสมตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในข้อ 4.3.1.2 อย่างไรก็ตามในกรณีการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุมส่วนหนึ่งที่เหมาะสมของเส้นลวดเชื่อมและฟลักซ์จะต้องถูกเลือกให้ได้ผลดีตรงตามความต้องการส่วนผสมทางเคมี และสมบัติทางกลสำหรับรอยเชื่อมต่อที่มุ่งหวังไว้

ในตารางที่ 4.16 แสดงฟลักซ์ชนิดหลอมละลาย (fused-type) และชนิดการประสาน (bonded-type) ที่มีใช้สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ฟลักซ์ทั้งสองชนิดนี้มีข้อดีและข้อเสียด้านความสามารถในการเชื่อมและความสามารถในการทำงาน

ฟลักซ์ชนิดหลอมละลายจะเก็บความชื้นไว้ด้วย แต่จะยอมให้โลหะรอยเชื่อมมีปริมาณไฮโดรเจนที่สูง ส่วนฟลักซ์ชนิดการประสานมีแนวโน้มที่จะเก็บความชื้นได้มาก แต่ก็สามารถทำให้รอยเชื่อมมีปริมาณไฮโดรเจนที่ต่ำ

ฟลักซ์ชนิดหลอมละลายจะให้การซึมลึกของรอยเชื่อมที่มาก ส่วนฟลักซ์ชนิดการประสานให้อัตราการหลอมตัวของฟลักซ์น้อย ฟลักซ์ที่เหมาะสมที่สุดควรจะถูกเลือกตามลักษณะเด่นเหล่านี้

#### 4.3.2.3 ข้อควรจำในวิธีดำเนินการในการเชื่อม

(Notes on welding procedures)

##### a) การอบแห้งฟลักซ์ (Drying of fluxes)

ฟลักซ์ชนิดหลอมละลายซึ่งประกอบด้วยอนุภาคคล้ายแก้ว ความชื้นในอากาศจะแทรกซึมเข้าไปได้ยาก ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับอาจจะมีประมาณ 0.01% หลังจากวางทิ้งไว้ 24 ชม. ในบรรยากาศ 30 °ซ. X 80%RH การดูดซับความชื้นของฟลักซ์ชนิดหลอมละลายจะเกิดขึ้นน้อยแม้ว่าจะทิ้งไว้ถึง 48 ชม. แต่ฟลักซ์นี้ก็สามารถดูดซับความชื้นได้ความชื้นที่ถูกดูด



จับอยู่บนอนุภาคของฟลักซ์ชนิดหลอมละลายอาจทำให้เกิดโพรงอากาศและการแตกร้าวในรอยเชื่อม ดังนั้นฟลักซ์ชนิดหลอมละลายจึงควรอบแห้งที่ 150-350 °ซ. เป็นเวลา 1 ชม. ก่อนการใช้งาน

#### b) การให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheating)

กฎทั่วไปสำหรับการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมในการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุมจะเกือบเหมือนกับในการเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คตามที่กล่าวไว้ในข้อ 4.3.1.3 (b) ในเชื่อมสูงชัน ตามรูปที่ 4.13 ความร้อนเข้าที่มากจะเป็นผลดีต่อการป้องกันการแตกร้าวร้อนเพราะว่าความร้อนเข้าที่มากเป็นผลให้อัตราการเย็นตัวในโลหะรอยเชื่อมต่ำ รูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนสามารถใช้ต่ำลงได้เมื่อความร้อนเข้ามีมากพอ ตามที่แสดงในตารางที่ 4.14 ในข้อ 4.3.1.3 อุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมที่ต่ำลงถูกระบุให้ใช้กับการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุม อย่างไรก็ตาม ความร้อนเข้าควรจะถูกกำหนดแน่นอนขึ้นอยู่กัวิธีดำเนินการในการเชื่อม เพราะว่าความร้อนเข้าที่สูงเป็นแนวโน้มให้เกิดการแตกร้าวร้อนในรอยเชื่อม

#### c) เงื่อนไขการเชื่อมและสมบัติทางกล

(Welding conditions and mechanical properties)

สมบัติทางกลของรอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุมจะมีผลมาจากกระแสไฟเชื่อม, แรงดันอาร์ค และความเร็วในการเชื่อม หรืออย่างน้อยก็จากความร้อนเข้า ผลของความร้อนที่มีต่อสมบัติทางกลจะเหมือนกับที่แสดงในรูปที่ 4.11 ในข้อ 4.3.1.3 ดังนั้นความร้อนเข้าจึงควรถูกควบคุมเพื่อที่จะให้ได้สมบัติทางกลเป็นที่น่าพอใจเพราะว่าความแข็งแรงทางแรงดึงและความเหนียวรอยบากจะลดต่ำลงเมื่อความร้อนเข้าเพิ่มสูงขึ้น

นอกจากนี้ การเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุมจะได้รับการซึมลึกที่มากกว่าการเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค การซึมลึกที่มากกว่านี้เป็นเหตุให้เกิดการเจือจางที่มากขึ้นจากโลหะชิ้นงาน การเจือจางที่มากขึ้นมีผลต่อส่วนผสมทางเคมี และสมบัติทางกลของโลหะรอยเชื่อม

#### d) ความสูงของแนวฟลักซ์ (Flux burden height)

ความสูงของแนวฟลักซ์มีผลต่อความสามารถในการเชื่อมของการเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุม เมื่อมันต่ำมากก็จะทำให้คลุมการอาร์คไม่หมดก็จะเกิดโพรงก๊าซและตะเข็บเชื่อมไม่สวยงาม แต่ถ้าสูงเกินไปก็จะทำให้การอาร์คไม่คงตัวและตะเข็บเชื่อมก็ไม่สวยงาม

### 4.3.3 การเชื่อมอาร์คก๊าซคลุม

(Gas metal arc welding)

#### 4.3.3.1 ชนิดและลักษณะที่สำคัญของเส้นลวดเชื่อม

(Types and features of welding wires)

ในการเชื่อมอาร์คก๊าซคลุมจะใช้ทั้งเส้นลวดตัน และเส้นลวดไส้ฟลักซ์

ตารางที่ 4.18 เป็นเส้นลวดไส้ตันกำหนดโดย JIS Z3312 สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงตารางที่ 4.19 เป็นเส้นลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ กำหนดโดย JIS Z3313 สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ชนิด 50 กก.แรง/มม<sup>3</sup> ในการเชื่อมอาร์คก๊าซคลุมมีก๊าซคลุมที่ใช้หลายชนิดเช่นก๊าซ CO<sub>2</sub>, ก๊าซผสม Ar+CO<sub>2</sub>

#### 4.3.3.2 การเลือกเส้นลวดเชื่อม

(Selection of welding wires)

ก๊าซคลุม CO<sub>2</sub> เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุดสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ในข้อดีทางด้านค่าใช้จ่าย อย่างไรก็ตามก๊าซผสม Ar+CO<sub>2</sub> จะใช้ได้ดีกว่าก๊าซคลุม CO<sub>2</sub> ในเมื่อโลหะรอยเชื่อมมีความต้องการความเหนียวรอยบากที่สูงกว่า

เพราะว่าเส้นลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมอาร์คก๊าซคลุมระบุก๊าซคลุมที่แน่นอนก็เพื่อที่จะได้ความต้องการที่น่าพอใจในด้านความสามารถในการทำงาน และสมบัติทางกล ดังนั้นเส้นลวดเชื่อมจึงควรถูกเลือกให้เหมาะสมเพื่อจะได้ผลดีเหล่านี้

เส้นลวดตัน ของชนิด JIS YGW11 เหมาะสำหรับกระแสไฟเชื่อมที่สูง และเส้นลวดเชื่อม JIS YGW12 เหมาะสำหรับกระแสไฟต่ำ ปริมาณของกระแสไฟเชื่อมจะกำหนดตำแหน่งการเชื่อมที่เหมาะสม เมื่อการเกิดประกายโลหะน้อย อัตราการหลอมละลายจะมากและตะเข็บรอยเชื่อมจะสวยงามก็เป็นจุดสำคัญ ดังนั้นเส้นลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ก็จะได้ดีกว่าเส้นลวดเชื่อมตัน ตารางที่ 4.20 เป็นแนวทางสำหรับการเลือกเส้นลวดเชื่อมที่เหมาะสม สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

#### 4.3.3.3 ข้อควรจำในวิธีดำเนินการในการเชื่อม

(Notes on welding procedure)

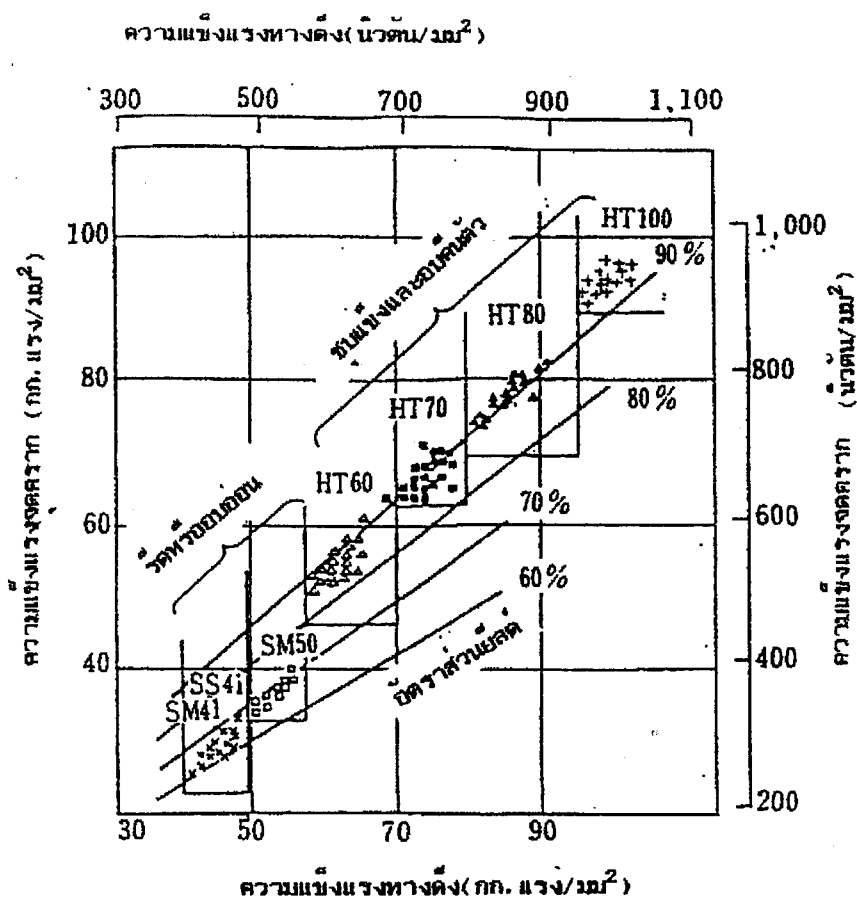
ในการเชื่อมอาร์คก๊าซคลุมให้ได้ผลสำเร็จดีนั้น สิ่งต่าง ๆ ต่อไปนี้ควรจะต้องจำนอกเหนือจากข้อควรจำธรรมดาของทุก ๆ กรรมวิธีการเชื่อม

- ก) ความบริสุทธิ์ของก๊าซ CO<sub>2</sub> ต้องไม่น้อยกว่า 99.5%
- ข) ความบริสุทธิ์ของก๊าซ Ar ต้องไม่น้อยกว่า 99.9%
- ค) อัตราการไหลของก๊าซคลุมต้องเป็น 20 ลิตร/นาที
- ง) ควรใช้ที่กำบังลมเพื่อรักษาก๊าซคลุมให้คงที่ เมื่อความเร็วของลมมากกว่า 2 เมตร / วินาที
- จ) ระยะระหว่างปลายหัวเชื่อมและโลหะชิ้นงานต้องอยู่ระหว่าง 10-15 มม. ในเมื่อกระแสไฟเชื่อมต่ำกว่า 250 แอมแปร์ และ 20-25 มม. เมื่อกระแสไฟเชื่อมสูงกว่า 250 แอมแปร์

#### 4.3.4 การเชื่อมอาร์คทั้งสแตน

**(Gas tungsten arc welding)**

การเชื่อมอาร์คทั้งสแตนถูกใช้สำหรับการเชื่อมท่อบาง ๆ และการเชื่อมชั้นเชื่อมที่ฐาน (root pass) ของท่อขนาดปานกลางและหนา นอกจากนี้ยังใช้สำหรับเชื่อมประกอบหัวชุดและภาชนะรับแรงดันโดยใช้กรรมวิธีเชื่อมแบบอัตโนมัติ ซึ่งให้อัตราการหลอมละลายที่สูง



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงจุดครากและความแข็งแรงทางดึงของเหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนของน้ำหนักของแผ่นเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงออกแบบเท่ากัน

ชนิดของเหล็ก	ความแข็งแรงจุดครากต่ำสุด (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	อัตราส่วนน้ำหนัก
เหล็กละมุน (SM41A)	24	1.00
HT50 (SM50A)	32	0.75
HT60 (HW46)	46	0.53
HT80 (HW-70)	70	0.34
HT-100(HW90)	90	0.27

- หมายเหตุ (1) ความแข็งแรงจุดครากต่ำสุดของ SM 41 M และ SM 50 A ของแผ่นเหล็กที่หนา 16-40 มม.
- (2) SM 41 A และ SM 50 A คือเหล็กกล้ารีดสำหรับโครงสร้างงานเชื่อมที่กำหนดโดยมาตรฐานอุตสาหกรรมของญี่ปุ่น (JIS G3106-88)
- (3) HW 46 และ HW70 คือเหล็กความแข็งแรงสูงที่เชื่อมได้กำหนดโดยมาตรฐานวิศวกรรมงานเชื่อม (WES 3001-83)

#### 4.3.4.1 ชนิดและลักษณะที่สำคัญของเส้นลวดเชื่อม

(Type and features of welding wires)

ตารางที่ 4.21 จะบอกรายละเอียดของเส้นลวดสำหรับการเชื่อมอาร์คทั้งสแตน ซึ่งกำหนดโดย JIS สมาคมการเชื่อมแห่งอเมริกาก็กำหนด AWS AS28 "Low Alloy Steel Filler Metals for Gas Shielded Arc Welding" สำหรับเส้นลวด

#### 4.3.4.2 การเลือกเส้นลวดเชื่อม

(Selection of welding wires)

เส้นลวดเชื่อมที่เหมาะสมสามารถเลือกได้ตามพื้นฐานความต้องการ ความแข็งแรงทางแรงดึง และส่วนผสมทางเคมีของโลหะรอยเชื่อม ส่วนผสมทางเคมีของโลหะรอยเชื่อมจะเกือบเท่ากับของเส้นลวดเชื่อม เพราะวาก้าชเลื่อย เช่น อาร์กอนจะถูกใช้เป็นก๊าซคลุม และการเจือจางของโลหะขึ้นงานก็น้อยมาก

#### 4.3.4.3 ข้อควรจำในวิธีดำเนินการในการเชื่อม

(Notes on welding procedure)

แม้ว่าอัตราการใช้ของก๊าซคลุมจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับกระแสไฟเชื่อม

และชนิดของรอยต่อในการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลส แต่ปกติก็จะใช้ 10-15 ลิตร / นาที เนื่องจากความ  
สมบูรณ์ของรอยเชื่อมในการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสามารถมีผลจากลมได้ง่าย ดังนั้นในบริเวณอาร์ค  
จึงควรมีฉากมาบังเพื่อรักษาสภาพก๊าซคลุมให้คงที่ เมื่อลมมีความเร็ว 1 เมตร / วินาทีหรือมากกว่า

# ตารางที่ 4.2 เหล็กกล้ารีดสำหรับโครงสร้างเชื่อม (JIS G 3106-88)

ตารางที่ 1.2 เหล็กกล้ารีดสำหรับโครงสร้างเชื่อม (JIS G 3106-88)

(max. = สูงสุด, min. = ต่ำสุด, kgf-m. = กก. แรง-ม.)

ประเภท	ส่วนผสมทางเคมี (%)					0.2% ความแข็งแรงจุดคราก (กก. แรง/มม <sup>2</sup> )			ความแข็งแรงทางดึง (กก. แรง/มม <sup>2</sup> ) for 100 มม	ค่าการชน	
	C	Si	Mn	P	S	16 มม max	18-40 มม	40-75 มม		อุณหภูมิสอบ	พลังงานดูดกลืน
SM50A	0.20 max สำหรับความหนาถึง 50 มม.										
	0.22 max สำหรับความหนา 50-100 มม.										
SM50B	0.18 max สำหรับความหนาถึง 50 มม.	0.55 max	1.60 max	0.035 max	0.035 max	33 min	32 min	30 min	50-62	0°C	2.8 kgf-m min
	0.20 max สำหรับความหนา 50-100 มม.										
SM50C	0.18 max สำหรับความหนาถึง 100 มม.									0°C	4.8 kgf-m min
SM50YA	0.20 max สำหรับความหนาถึง 100 มม.	0.55 max	1.60 max	0.035 max	0.035 max	37 min	36 min	34 min	50-62		
SM50YB										0°C	2.8 kgf-m min
SM53B	0.20 max สำหรับความหนาถึง 100 มม.	0.55 max	1.60 max	0.035 max	0.035 max	37 min	36 min	34 min	53-65	0°C	2.8 kgf-m min
SM53C										0°C	4.8 kgf-m min
SM58	0.18 max สำหรับความหนาถึง 100 มม.	0.55 max	1.60 max	0.035 max	0.035 max	47 min	46 min	44 min	58-73	-5°C	4.8 kgf-m min

หมายเหตุ (1) ค่าเฉลี่ยของ 7 ส่วนจากเนื้อทดสอบต้องยาว

(2) เมื่อพิจารณา SM58 ความหนาขั้นต่ำสูงสุดเป็น 0.44% สำหรับความหนาถึง 50 มม., สูงสุด 0.47% สำหรับความหนา 50-100 มม.  $Ceq = C + 1/6Mn + 1/24Si + 1/40Ni + 1/5Cr + 1/4Mo + 1/14V$

ในการแปลค่าความเปราะเหนียว ค่าความยาวการแตกหัก (Pcm) จะสูงสุดที่ 0.28 สำหรับความหนาถึง 50 มม., 0.30 สำหรับความหนา 50-100 มม.

$Pcm(\%) = C + 1/30Si + 1/20Mn + 1/20Cu + 1/50Ni + 1/20Cr + 1/15Mo + 1/10V + 5B$

ตารางที่ 4.3 แผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่เชื่อมได้ (WES 3001-83)

ประเภท	ส่วนผสมทางเคมี(%)			ความแข็งแรง จุดคราก (กก. แรง/มม <sup>2</sup> )	ความแข็งแรง ทางดึง (กก. แรง/มม <sup>2</sup> )	ความหนาของ แผ่น(มม.)	ค่าการเผด. 2 มม. วั		Pcm (1)			
									รายละเอียด		รายละเอียด	
									TR		NTR	
	C	P	S				อุณหภูมิ (°C.)	พดงาน (กก. แรง-มม.)	T ≤ 50	50 < T ≤ 75	T ≤ 50	50 < T ≤ 75
HW 36	0.20 max	0.030 max	0.025 max	36 min	53-65	T ≤ 13 13 < T ≤ 20 20 < T ≤ 32 T > 32	-	-	-	-	-	-
							+15	4.8 min	-	-	0.32 max	-
							0	4.8 min	-	-	-	-
							-5	4.8 min	-	-	-	-
HW 40	0.20 max	0.030 max	0.025 max	40 min	57-70	T ≤ 13 13 < T ≤ 20 20 < T ≤ 32 T > 32	-	-	-	-	0.34 max	-
							+15	4.8 min	-	-	-	-
							0	4.8 min	-	-	-	-
							-5	4.8 min	-	-	-	-
HW 46	0.18 max	0.030 max	0.025 max	46 min	60-72	T ≤ 13 13 < T ≤ 20 20 < T ≤ 32 T > 32	-	-	0.28 max	0.30 max	0.35 max	0.28 max
							+10	4.8 min	-	-	-	-
							-5	4.8 min	-	-	-	-
							-5	4.8 min	-	-	-	-
HW 50	0.18 max	0.030 max	0.025 max	50 min	62-75	T ≤ 13 13 < T ≤ 20 20 < T ≤ 32 T > 32	-	-	0.28 max	0.30 max	0.38 max	0.28 max
							+5	4.8 min	-	-	-	-
							-10	4.8 min	-	-	-	-
							-15	4.8 min	-	-	-	-

หมายเหตุ (1) Pcm = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B

TR = การใช้ความร้อน , NTR = ไม่ใช้ความร้อน

(max. = สูงสุด, min. = ต่ำสุด)

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) แผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่เชื่อมได้ (WES 3001-83)

ประเภท(2)	ค่าความแข็งแรงเชื่อม (%)			ความแข็งแรง จุดเชื่อม (กก. แรง/มม <sup>2</sup> )	ความแข็งแรง ทางดึง (กก. แรง/มม <sup>2</sup> )	ความหนาของ แผ่น(มม.)	ค่าความหนา 2 มม. 4		PCM (1)				
							C	P	S	ระดับ A		ระดับ B	
	TR	NTR	TR							TR			
												T ≤ 50	50 < T ≤ 75
HW 56	0.18 max	0.030 max	0.025 max	56 min	68-82	T ≤ 13 13 < T ≤ 20 20 < T ≤ 32 T > 32	- +5 -10 -15	- 4.8 min 4.8 min 4.8 min	0.30 max	-	0.32 max	0.28 max	0.30 max
HW 63	0.18 max	0.030 max	0.025 max	63 min	72-86	T ≤ 13 13 < T ≤ 20 20 < T ≤ 32 T > 32	- 0 -15 -20	- 4.0 min 4.0 min 4.0 min	0.31 max	-	0.33 max	0.29 max	0.31 max
HW 70	0.18 max	0.025 max	0.020 max	70 min	80-95	T ≤ 13 13 < T ≤ 20 20 < T ≤ 32 T > 32	- -5 -15 -20	- 3.6 min 3.6 min 3.6 min	0.33 max	-	0.35 max	0.30 max	0.32 max
HW 80	0.18 max	0.025 max	0.020 max	80 min	90-105	T ≤ 13 13 < T ≤ 20 20 < T ≤ 32 T > 32	- -5 -20 -25	- 2.8 min 2.8 min 2.8 min	0.35 max	-	0.37 max	0.33 max	0.35 max

(max. = สูงสุด, min. = ต่ำสุด)

หมายเหตุ (1)  $PCM = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$

TR = การรับสภาพใช้ความร้อน, NTR = การรับสภาพน้ำใช้ความร้อน

(2) อ้างอิง WES 3001 สำหรับ HW90



ตารางที่ 4.4 ท่อเหล็ก (API 5L-83)

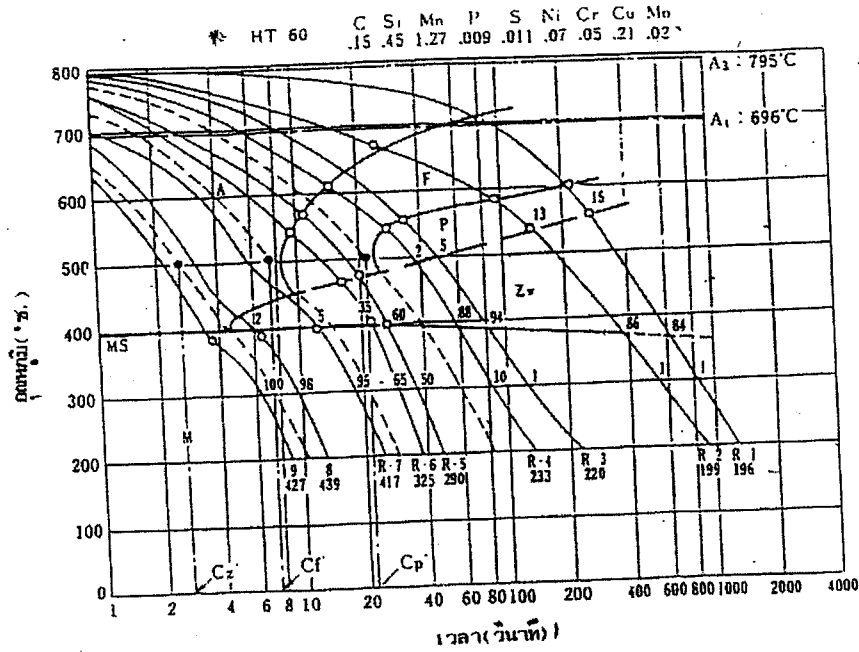
ประเภท	ส่วนผสมทางเคมี (%)					ความแข็งแรง จุดคราก นอนค./นิ้ว <sup>2</sup> (กก. แรง/นิ้ว <sup>2</sup> )	ความแข็งแรง ทางดึง นอนค./นิ้ว <sup>2</sup> (กก. แรง/นิ้ว <sup>2</sup> )
	C	Mn	P	S	อื่น ๆ		
X52	(1) 0.31 0.29 0.30 0.28 max	(1) 1.35 1.25 1.35 1.25 max	0.04 max	0.05 max	-	52,000 (36.6)	(3) 66,000 (46.4) 72,000 (50.6)
X56						56,000 (39.2)	(3) 71,000 (49.9) 75,000 (52.7)
X60	0.26 max	1.35 max	0.04 max	0.05 max	Nb:0.005 V:0.02 Ti:0.03 max	60,000 (42.2)	(3) 75,000 (52.7) 78,000 (54.8)
X65 (2)	0.26 max	1.40 max	0.04 max	0.05 max	Nb:0.005 V:0.2	65,000 (45.7)	(3) 77,000 (54.1) 80,000 (56.2)
X70 (2)	0.23 max	1.60 max	0.04 max	0.05 max	-	70,000 (49.2)	82,000 (57.6)

- หมายเหตุ (1) ความต้องการคาร์บอนและมังกานีสขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิต (ไม่มีตะเข็บหรือเชื่อมประสาน)
- (2) ขึ้นกับข้อตกลงระหว่างผู้ผลิตและผู้ซื้อสำหรับท่อไม่มีตะเข็บ
- (3) ความต้องการความแข็งแรงทางดึงขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิต (ไม่มีตะเข็บหรือเชื่อมประสาน)

ตารางที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

ระดับความแข็งแรงทางดึง	โครงสร้างจุลภาค	การกระทำทางความร้อน (1)
50 กก. แรง/มม <sup>2</sup>	เฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์	ปรับสภาพไม่ใช้ความร้อน
60 กก.แรง/มม <sup>2</sup>	เฟอร์ไรท์-เบนไนท์	ปรับสภาพไม่ใช้ความร้อน
	เบนไนท์	ปรับสภาพใช้ความร้อน
80 กก.แรง/มม <sup>2</sup>	มาร์เทนไซต์-เบนไนท์ละเอียด	ปรับสภาพใช้ความร้อน

- หมายเหตุ (1) การปรับสภาพไม่ใช้ความร้อนรวมถึง การรีด, การรีดและการอบคืนตัว, การนอร์มัลไลซิ่ง และการนอร์มัลไลซิ่งกับการอบคืนตัว



A = บริเวณออสไนติก

F = บริเวณเฟอร์ไรติก

P = บริเวณเพิร์ลไลติก

Zw = บริเวณเบนไนติก

M = บริเวณมาร์เตนไซต์ติก

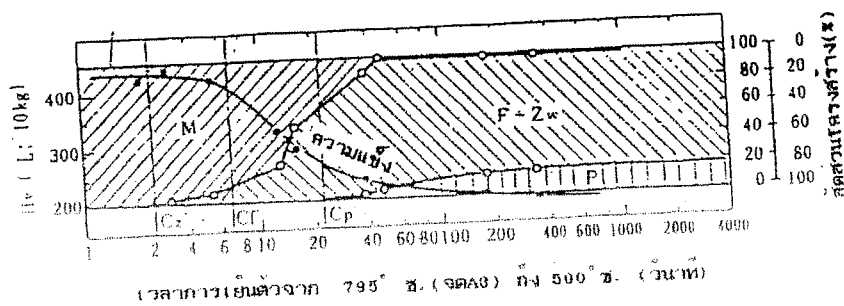
HV = ความแข็งวิกเกอร์

----- = เส้นโค้งการเย็นวิฤติ

รูปที่ 4.2 เส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการเย็นตัวต่อเนื่องในการเชื่อมเหล็กความแข็งแรง

60

กก.แรง/ม<sup>2</sup> (อุณหภูมิความร้อน : 1350 °ซ. สูงสุด)



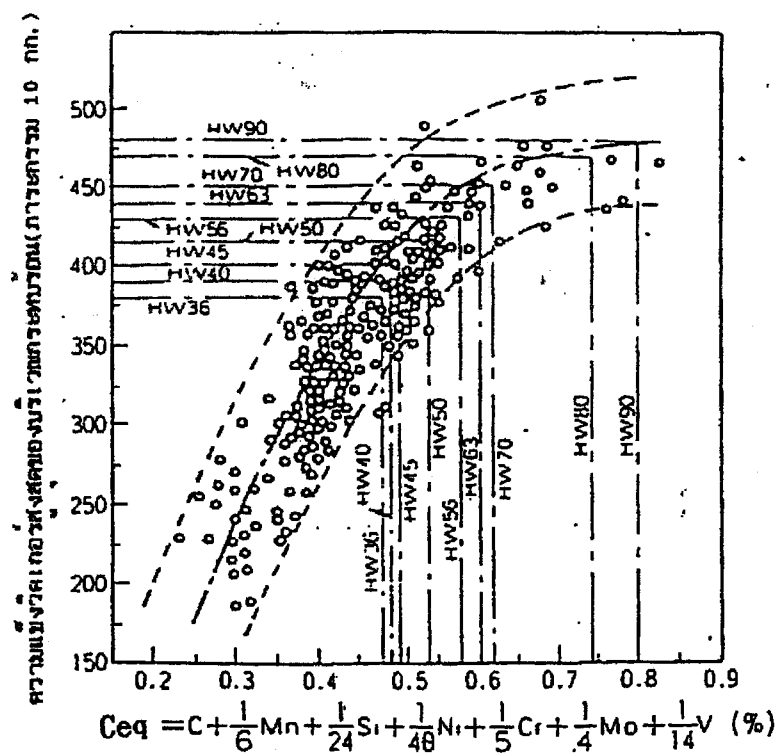
M = บริเวณมาร์เตนไซต์ติก

Zw = บริเวณเบนไนติก

F = บริเวณเฟอร์ไรติก

P = บริเวณเพิร์ลไลติก

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง, โครงสร้างและเวลาการเย็นตัว จาก 795°ซ (จุด A3) ถึง 500°ซ. ในการเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 60 กก. แรง/ม<sup>2</sup>



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ceq ของเหล็กความแข็งแรงสูง และความแข็งสูงสุดของบริเวณ  
กระแทกร้อน

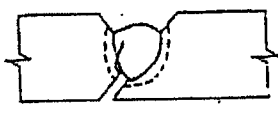

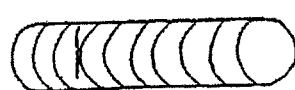

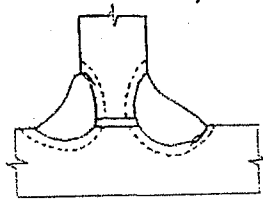
เงื่อนไขการทดสอบ

ความหนาแน่น : 20 มม.

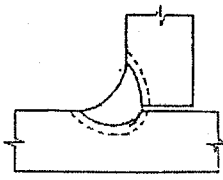
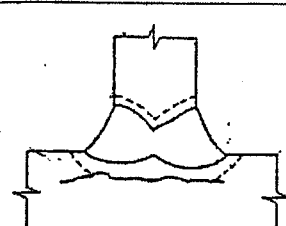
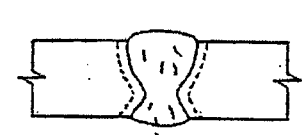
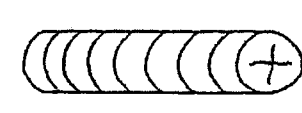
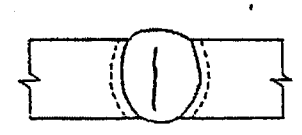
อัตราการเย็นตัว : 28 ซม./วินาที ที่ 540°ซ.

เวลาการเย็นตัว : 6 วินาที จาก 800° ถึง 500°ซ.

ตารางที่ 4.6 ชนิดและลักษณะที่สำคัญของรอยแตกในการเชื่อม

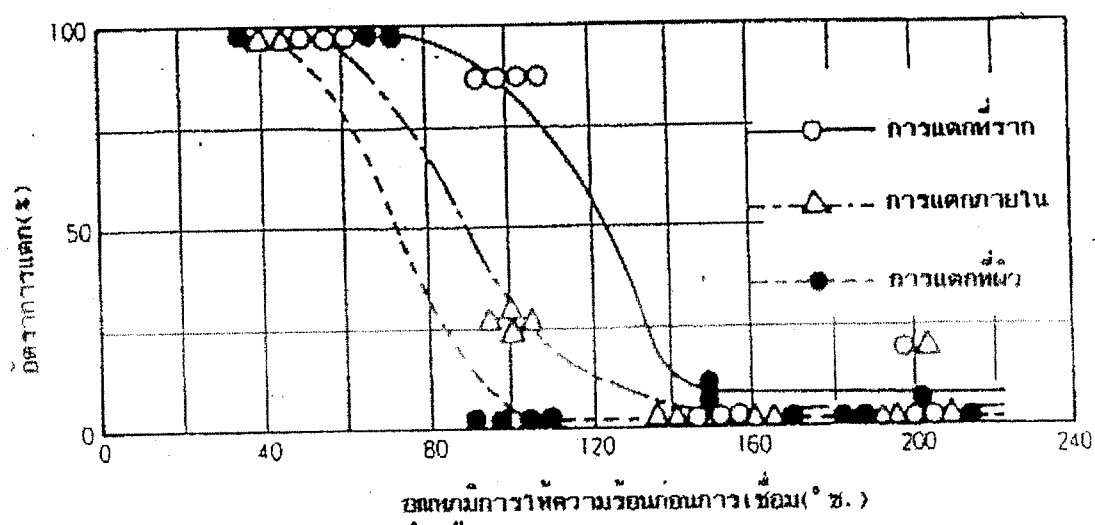
ชนิดของรอยแตก		บริเวณการเกิด	รอยแตกปรากฏ	สาเหตุ
Cold crack การแตกเย็น	Root crack รอยแตกที่ราก	HAZ รอยเชื่อม		(1) ใช้โครงงานในรอยเชื่อม (2) ความเปราะของรอยเชื่อม (3) การกระจัดตัวของความเค้น
	Longitudinal crack รอยแตกตามยาว	HAZ รอยเชื่อม		(1) ใช้โครงงานในรอยเชื่อม (2) ความเปราะของรอยเชื่อม (3) การกักความเค้น
	Transversal crack รอยแตกตามขวาง	HAZ รอยเชื่อม		(1) ใช้โครงงานในรอยเชื่อม (2) ความเปราะของรอยเชื่อม
	Underbead crack รอยแตกใต้ตะขี้เชื่อม	HAZ		(1) ใช้โครงงานในรอยเชื่อม (2) ความเปราะของรอยเชื่อม (3) การกักความเค้น
	Toe crack รอยแตกที่ขอบ	HAZ		(1) ใช้โครงงานในรอยเชื่อม (2) ความเปราะของรอยเชื่อม (3) การกระจัดตัวของความเค้น

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) ชนิดและลักษณะที่สำคัญของรอยแตกในการเชื่อม

ชนิดของรอยแตก		บริเวณการเกิด	รอยแตกปรากฏ	สาเหตุ
Cold crack การแตกเย็น	Heel crack รอยแตกส่วนงอ	HAZ		(1) ใช้โลหะเชื่อมรอยเชื่อม (2) ความเปราะของรอยเชื่อม (3) การกระจัดของความเค้น
	Lamellar tear รอยฉีกเป็นแผ่น	HAZ		(1) การอ่อนตัวไม่พอเพียงในทิศทางความหนาของแผ่น (2) มีสิ่งพัวพันในโลหะชิ้นงาน (3) มีโลหะฝังในรอยในโลหะชิ้นงาน (4) ใช้โลหะเชื่อมรอยเชื่อม (5) การกักความเค้น
Hot crack การแตกร้อน	Inter-crystalline microcrack รอยแตกจุลภาคขอบเกรน	HAZ รอยเชื่อม		(1) การแยกตัวของสิ่งแปลกปลอม เช่น S และ P ที่ขอบเกรน (2) ความเปราะของรอยเชื่อมที่ 1000° ซ.
	Craier crack รอยแตกนอกลายตะขิงเชื่อม	รอยเชื่อม		(1) การแยกตัวของสิ่งแปลกปลอม เช่น S และ P ที่ตรงกลางนอกลายตะขิงเชื่อม (2) การหดตัวของช่องว่าง
	Pear-shape crack รอยแตกลูกแพร์	รอยเชื่อม		(1) การแยกตัวของสิ่งแปลกปลอม เช่น S และ P ที่โครงสร้างกิ่งไม้

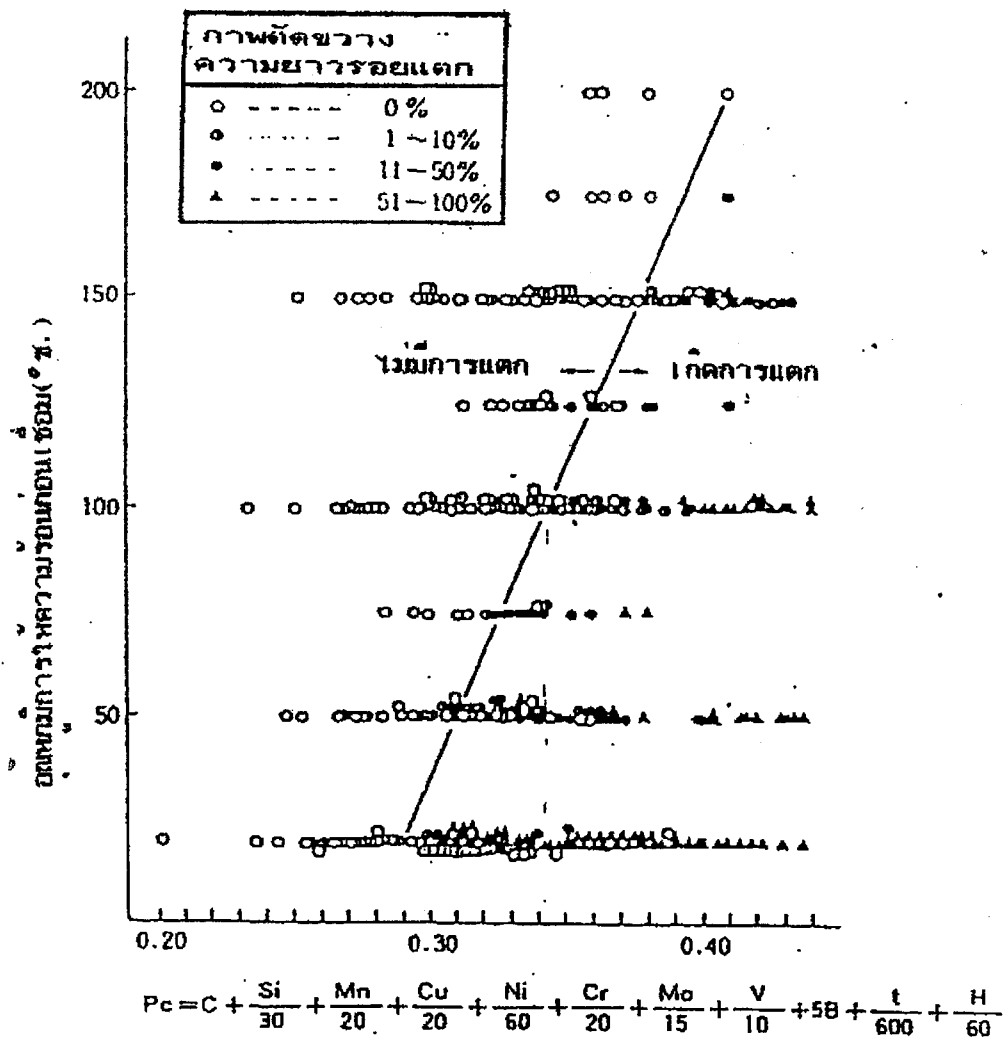
ตารางที่ 4.7 วิธีการทดสอบหาความไวในการแตกร้าว

ชนิดของ รอยแตก	ชนิดของรอยเชื่อม	เชื่อมต่อนาก
	เชื่อมต่อน	
รอยแตกเย็น	(1) ทดสอบการแตก ร่อง-U (JIS Z 3157) (2) ทดสอบการแตก ร่อง-Y (JIS Z 3158) (3) ทดสอบการแตกรอยเชื่อมกักตัว ชนิด -H (JIS Z 315g)	CTS (ทดสอบการแตกโดยควบคุมความ ร้อนอย่างเคร่งครัด) (JIS Z 3154)
รอยแตกร้อน	ทดสอบการแตก FISCO (JIS 2 3155)	(1) ทดสอบการแตกรอยเชื่อมต่อนาก -T (JIS Z 3153) (2) ทดสอบการแตกชนิดการขยายมุม (JIS Z 3156)



รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบการแตกร่องตัววาย ของรอยเชื่อมเหล็กกล้า

ความแข็งแรงสูง 80 กก.แรง/มม<sup>2</sup>



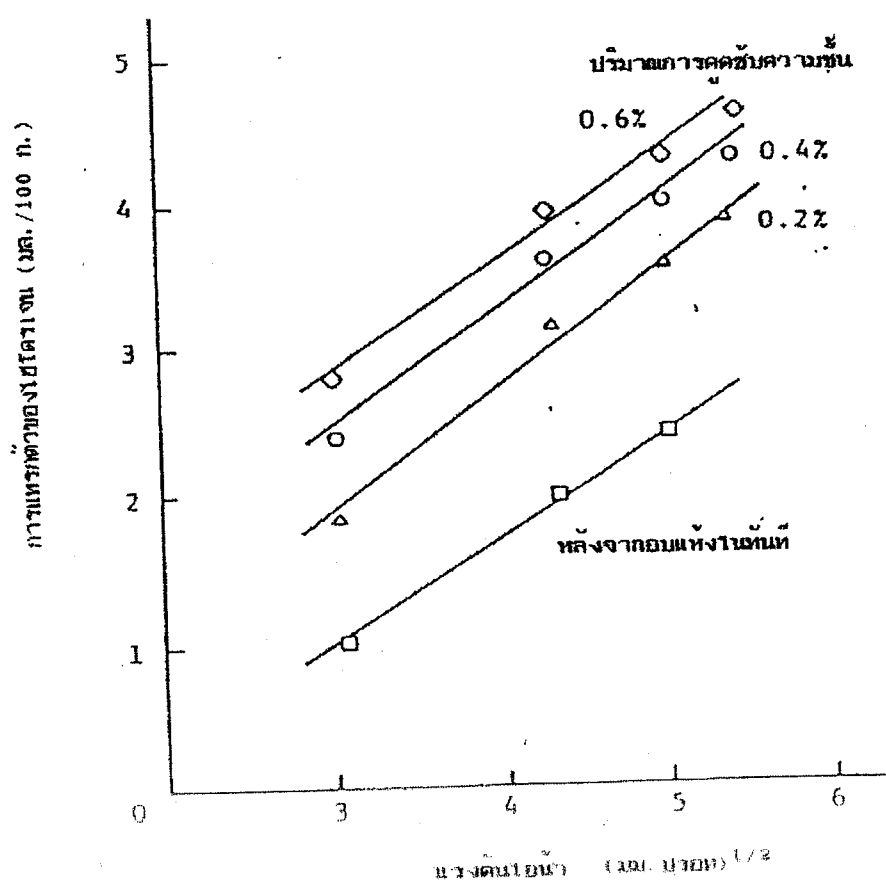
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การแตก (Pc) และอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนเชื่อมต่อการแตกเร็วของรอยเชื่อม (WES-135-72)

ช่วงที่สามารถใช้งานได้

ตารางที่ 4.8 ค่าทั่วไปของการแทรกตัวของไฮโดรเจนของเนื้อโลหะเดิม (มล./100 ก.)

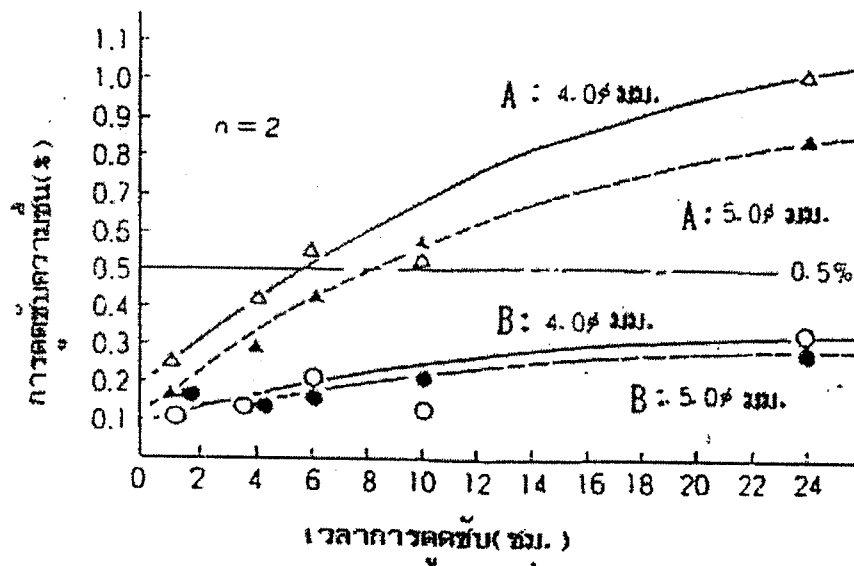
การนำไปใช้งาน	ชนิดไฮโดรเจนต่ำ	ชนิดไฮโดรเจนต่ำพิเศษ	ชนิดไฮโดรเจนต่ำอุตสาหกรรม
For HT50	4.0	2.0	1.0
For HT60	-	2.0	1.0
For HT80	-	2.0	1.0

หมายเหตุ : โดยวิธีใช้กลีเซอโรลแทนที่ (JIS Z 3113-75)



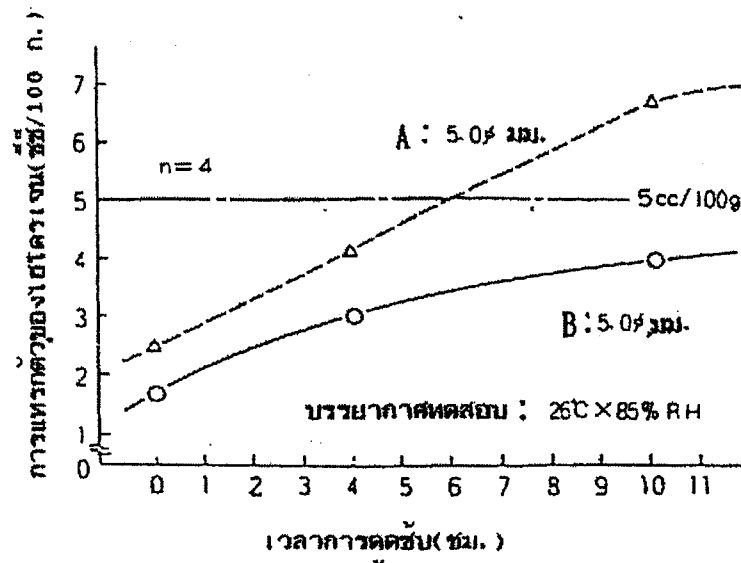
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกตัวของไฮโดรเจนของโลหะเดิม และแรงดันไอน้ำของบรรยากาศทดสอบ





รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบการดูดกลืนความชื้นของอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ชนิดไฮโดรเจนต่ำ 50 กก.  
แรง/มม<sup>2</sup>

ตัวอย่าง A = ชนิดไฮโดรเจนต่ำธรรมดา  
B = ชนิดไฮโดรเจนต่ำต้านทานความชื้น



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกตัวของไฮโดรเจนของอิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำกับ  
เวลาการวางฝังไว้ ตัวอย่าง A = ชนิดไฮโดรเจนต่ำธรรมดา  
B = ชนิดไฮโดรเจนต่ำต้านทานความชื้น

ตารางที่ 4.9 กรรมวิธีการเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

กรรมวิธีการเชื่อม	ชนิดของเหล็กความแข็งแรงสูง				
	HT50	HT60	HT70	HT80	HT100
การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค	◎	◎	◎	◎	◎
การเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลม	◎	◎	◎	◎	△
การเชื่อมแก๊ส (CO <sub>2</sub> )	◎	○	△	△	-
การเชื่อมแก๊ส (Ar+CO <sub>2</sub> )	△	○	◎	◎	○
การเชื่อมทก	○	○	○	○	◎
การเชื่อมอิเล็กโทรสแลค	◎	△	-	-	-
การเชื่อมอาร์คอิเล็กโทรสแกซ	◎	○	-	-	-

หมายเหตุ: ◎: ใช้อย่างกว้างขวาง ○: ใช้ปกติ △: ใช้น้อย

ชนิดของเหล็ก (Ceq)	<div> <div></div> : ไม่ให้ความร้อนก่อนเชื่อม <div></div> : ให้ความร้อนก่อนเชื่อม </div>
HT80 (0.54)	<div> <div></div> D8016 (120-180 °C) </div>
HT70 (0.51)	<div> <div></div> D7016 (100-150 °C) </div>
HT60 (0.43)	<div> <div></div> D6216 (80-120 °C) (มากกว่า 120° ซ.) </div>
HT50 (0.40)	<div> <div></div> D5316 (80-120 °C) (มากกว่า 120° ซ.) </div>
HT50 (0.36)	<div> <div></div> D5016, D5026 (80-120 °C) </div>
ความหนาของแผ่น (mm.)	10 20 30 40

รูปที่ 4.10 แนวทางการเลือกอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์และอุณหภูมิให้ความร้อนก่อนเชื่อมที่ถูกต้องสำหรับเหล็กความแข็งแรงสูง

ตารางที่ 4.10 มาตรฐานสำหรับอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับเหล็กทนแรงดึงสูง (JIS Z 3212-82 & 3213-77)

ชนิดของอิเล็กโทรด	ชนิดของเปลือกปลั๊ก	สมบัติทางกลของเนื้อโลหะรอยเชื่อม				ปริมาณไฮโดรเจน (มล./ก.)
		ค่าจุดคราก- กก.แรง/มม. <sup>2</sup> (นิวตัน/มม. <sup>2</sup> )	ความแข็งแรงทางแรงดึง กก.แรง/มม. <sup>2</sup> (นิวตัน/มม. <sup>2</sup> )	ค่ายืด %	ค่าการกระแทก กก.แรง-ม. (จูล)	
D 5000 D 5001 D 5003 * D 5016 D 5026	ชนิดพิเศษ ชนิดอิลเมไนท์ ชนิดโลมโตลาเซียม ชนิดไฮโดรเจนต่ำ ชนิดผงเหล็กไฮโดรเจนต่ำ	≥ 40 (≥ 392)	≥ 50 (≥ 490)	≥ 20  ≥ 23	≥ 4.8 (≥ 47) 0°C	—  ≤ 0.10
D 5300 D 5316 D 5326	ชนิดพิเศษ ชนิดไฮโดรเจนต่ำ ชนิดผงเหล็กไฮโดรเจนต่ำ	≥ 42 (≥ 410)	≥ 53 (≥ 520)	≥ 18  ≥ 20	≥ 4.8 (≥ 47) 0°C	—  ≤ 0.08
D 5816 D 5826	ชนิดไฮโดรเจนต่ำ ชนิดผงเหล็กไฮโดรเจนต่ำ	≥ 50 (≥ 490)	≥ 58 (≥ 570)	≥ 18	≥ 4.8 (≥ 47) -5°C	≤ 0.06
D 6200 D 6216 D 6218	ชนิดพิเศษ ชนิดไฮโดรเจนต่ำ ชนิดผงเหล็กไฮโดรเจนต่ำ	≥ 51 (≥ 500)	≥ 62 (≥ 608)	≥ 15  ≥ 17	≥ 3.5 (≥ 34) 0°C ≥ 4.0 (≥ 39) -20°C	—  ≤ 0.05
D 7000 D 7016 D 7018	ชนิดพิเศษ ชนิดไฮโดรเจนต่ำ ชนิดผงเหล็กไฮโดรเจนต่ำ	≥ 56 (≥ 549)	≥ 70 (≥ 686)	≥ 14  ≥ 16	≥ 3.5 (≥ 34) 0°C ≥ 4.0 (≥ 39) -20°C	—  ≤ 0.05
D 7600 D 7616 D 7618	ชนิดพิเศษ ชนิดไฮโดรเจนต่ำ ชนิดผงเหล็กไฮโดรเจนต่ำ	≥ 63 (≥ 618)	≥ 76 (≥ 745)	≥ 13  ≥ 15	≥ 3.5 (≥ 34) 0°C ≥ 4.0 (≥ 39) -20°C	—  ≤ 0.04
D 8000 D 8016 D 8018	ชนิดพิเศษ ชนิดไฮโดรเจนต่ำ ชนิดผงเหล็กไฮโดรเจนต่ำ	≥ 68 (≥ 667)	≥ 80 (≥ 785)	≥ 13  ≥ 15	≥ 3.5 (≥ 34) 0°C ≥ 4.0 (≥ 39) -20°C	—  ≤ 0.03

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบ การแตกร้าวร้าวด้วย

ชนิดของเหล็ก	เงื่อนไขการอบแห้งของ ชิ้นเหล็ก	ชนิดของ ชิ้นเหล็ก	ปริมาณที่ใช้ตรวจ	อุณหภูมิให้ความร้อนก่อนอบ (°C.)							
				0°C	25 °C	50 °C	75 °C	100 °C	125 °C	150 °C	175 °C
HT50, T=25mm Ceq=0.40 Pcm=0.24	หลังจากการอบแห้ง : 350° ซ. x 1 ซม.	D5016	ต่ำพิเศษ	—	—	—	—	○○○	○○○	○○○	—
		D5016	ต่ำธรรมดา	—	—	—	●●●	○○○	○○○	—	—
	หลังจากการอบแห้ง 4 ซม. ในบรรยากาศ : 30° ซ. x 80%	D5016	ต่ำพิเศษ	—	—	—	—	—	○○○	○○○	○
		D5016	ต่ำธรรมดา	—	—	—	—	●○○	○○○	○○○	—
HT60, T=38mm Ceq=0.35 Pcm=0.19	หลังจากการอบแห้ง : 350° ซ. x 1 ซม.	D6216	ต่ำพิเศษ	●●●	○○○	○○○	—	—	—	—	—
		D6216	ต่ำธรรมดา	○○○	○○○	○○○	—	—	—	—	—
	หลังจากการอบแห้ง 4 ซม. ในบรรยากาศ : 30° ซ. x 80%	D6216	ต่ำพิเศษ	●●●	●●●	○○○	—	—	—	—	—
		D6216	ต่ำธรรมดา	●○○	○○○	○○○	—	—	—	—	—
HT80, T=40mm Ceq=0.50 Pcm=0.25	หลังจากการอบแห้ง : 350° ซ. x 1 ซม.	D8016	ต่ำพิเศษ	—	—	—	●●●	○○○	—	—	—
		D8016	ต่ำธรรมดา	—	●●●	●●●	○○○	—	—	—	—

หมายเหตุ : ● : เกิดการแตก, ○ : ไม่เกิดการแตก

$Ceq = C + 1/6 Mn + 1/24 Si + 1/40 Ni + 1/5 Cr + 1/4 Mo + 1/14 V$   
 $Pcm (\%) = C + 1/30 Si + 1/20 Mn + 1/20 Cu + 1/60 Ni + 1/20 Cr + 1/15 Mo + 1/10 V + 5B$

การแทรกซึมโดยของไฮโดรเจน : ต่ำพิเศษ = 1.5-3 มล./100 ก., ต่ำธรรมดา = 0.5-1.5 มล./100 ก.

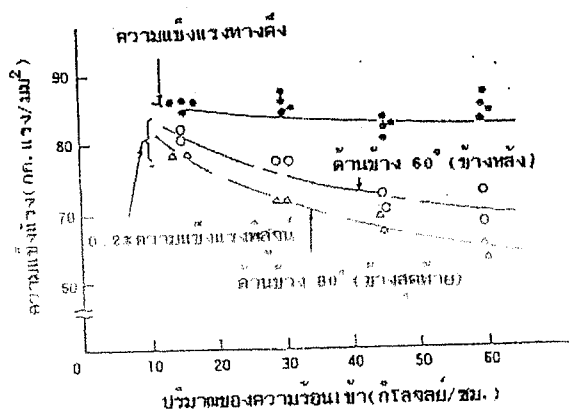
โดยสำนักงานเหล็ก (JIS 2 3113-75)



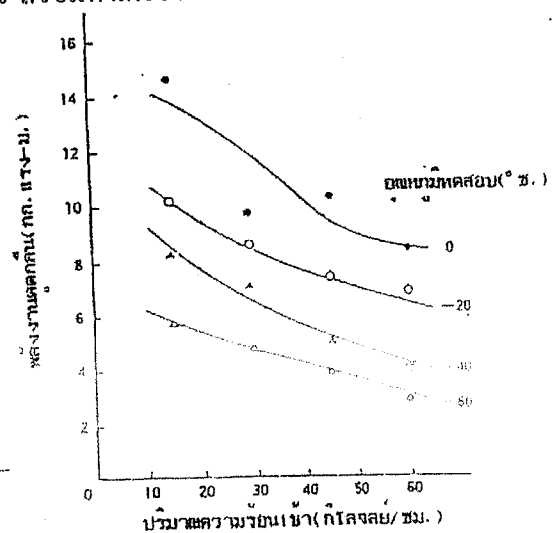
ตารางที่ 4.14 อุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนเชื่อมต่ำสุดสำหรับการสร้างสะพานทางหลวงฮานชิน  
ในญี่ปุ่น

ชนิดของการ การเชื่อม	กรรมวิธีการ เชื่อม	SMAW	SMAW	GMAW, SAW	SMAW	GMAW, SAW	SMAW	GMAW	SAW		
	ชนิดของ เหล็ก	SM41 SS 41	SM50		SM58		HT70, HT80				
	ความ หนาแน่นงาน	รอยต่อ ต่อมม	รอยต่อ ต่อมม		รอยต่อ ต่อมม		รอยต่อ ต่อมม		รอยต่อ	รอยต่อ	
การเชื่อม เหล็ก	≤25	-	-	-	40	-	-	-	-	-	
	25<≤38	40	40	-	80	40	100	80	100	80	
	38<≤50	-	80	coner joint' 40	80	60	100	80	100	80	
	50<t	-	100	80	100	80	120	100	150	100	
การเชื่อม แผ่น	≤25	-	-	-	60	-	-	-			
	25<≤38	-	60	-	100	CO <sub>2</sub> 80	120	CO <sub>2</sub> 100			
	38<≤50	60	100	CO <sub>2</sub> 60	100	CO <sub>2</sub> 80	120	CO <sub>2</sub> 100			
	50<t	-	-	-	120	CO <sub>2</sub> 100	150	CO <sub>2</sub> 100			

- หมายเหตุ : (1) อุณหภูมิอุณหิงานสูงสุดและอุณหิงานระหว่างชั้นเชื่อม สำหรับเหล็ก HT 70 และ HT 80 ควรน้อยกว่า 200°C (t < 50) และ (t > 50)
- (2) ช่วงการอุณหิงานควรมีความยาวมากกว่า 100 มม. ที่ปลายทั้งสองของแนวเส้นการเชื่อม ซึ่งควรรักษาอุณหิงานให้สม่ำเสมอ
- (3) การวัดอุณหิงานอุณหิงานและอุณหิงานระหว่างชั้นเชื่อมควรวัดที่จุดห่างจากแนวเส้นการเชื่อม 50 มม. ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ หรือแท่งเครอน

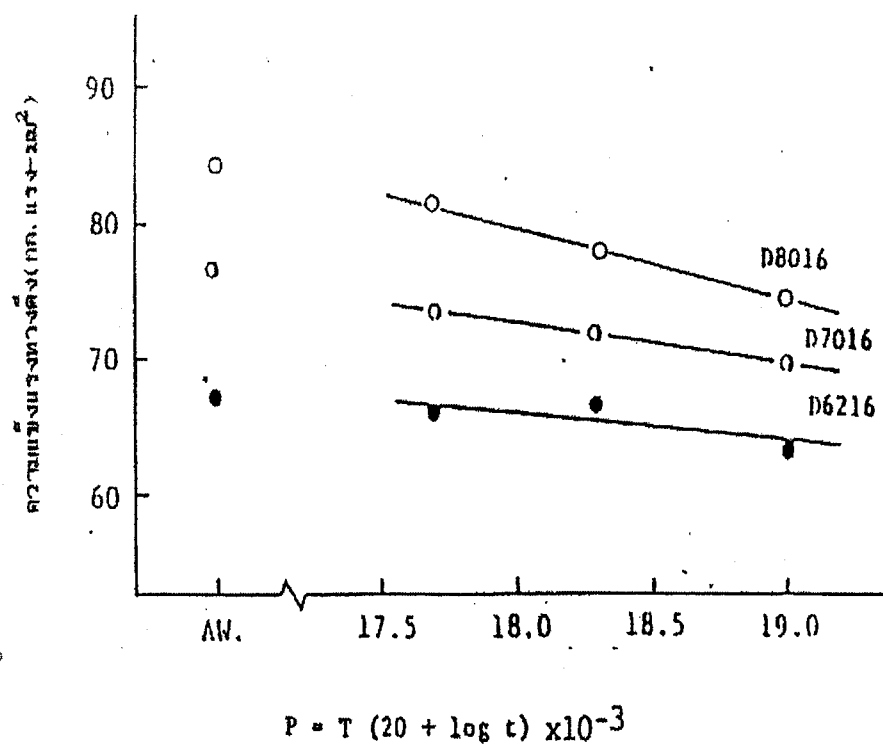


(A) ปริมาณของความร้อนเข้าและ 0.2% ความเค้นพิสูจน์



(B) ปริมาณของความร้อนเข้าและพลังงานต่อลูก

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนเข้าและสมบัติทางกลของเหล็กความแข็งแรงสูง 80 กก. แรง/ม.² ที่เชื่อมโดย SMAW



รูปที่ 4.12 ผลของ PWHT ต่อความแข็งแรงทางดึงของรอยเชื่อมเหล็กความแข็งแรงสูง

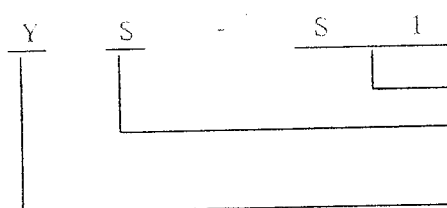
ในเมื่อ P = พารามิเตอร์การอบคืนตัว  
 T = อุณหภูมิ PWHT (°K)  
 t = เวลา PWHT (h)

ตารางที่ 4.15 การแบ่งประเภทของเส้นลวดเชื่อม (JIS.Z 3351)

การแบ่งประเภท	ชนิด	การแบ่งประเภท	ชนิด
YS-S1 YS-S2 YS-S3 YS-S4 YS-S5 YS-S6 YS-S7 YS-S8	ชนิด Si - Mn	YS-N1 YS-N2	Ni Type
		YS-NM1 YS-NM2 YS-NM3 YS-NM4 YS-NM5 YS-NM6	ชนิด Ni - Mo
YS-M1 YS-M2 YS-M3 YS-M4 YS-M5	ชนิด Mo	YS-NCM1 YS-NCM2 YS-NCM3 YS-NCM4 YS-NCM5 YS-NCM6	ชนิด Ni - Cr - Mo
YS-CM1 YS-CM2 YS-CM3 YS-CM4 YS-CM5 YS-1CM1 YS-1CM2 YS-2CM1 YS-2CM2 YS-3CM1 YS-3CM2 YS-5CM1 YS-5CM2	ชนิด Cr - Mo	YS-CuC1 YS-CuC2	ชนิด Cu - Cr
		YS-G	-

หมายเลข

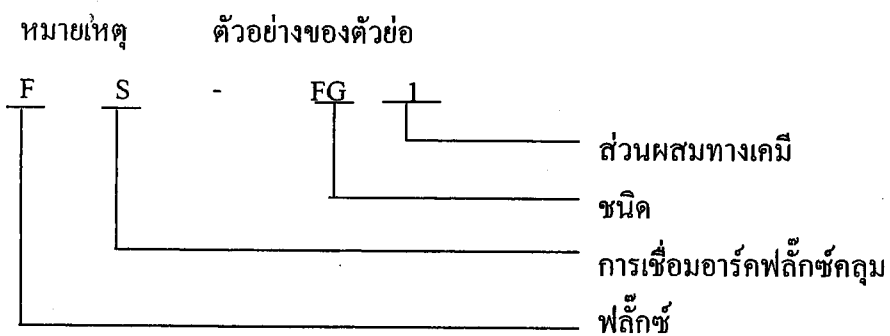
ตัวอย่างด้วยย่อ





ตารางที่ 4.16 การแบ่งประเภทของฟลักซ์ (JIS Z 3352)

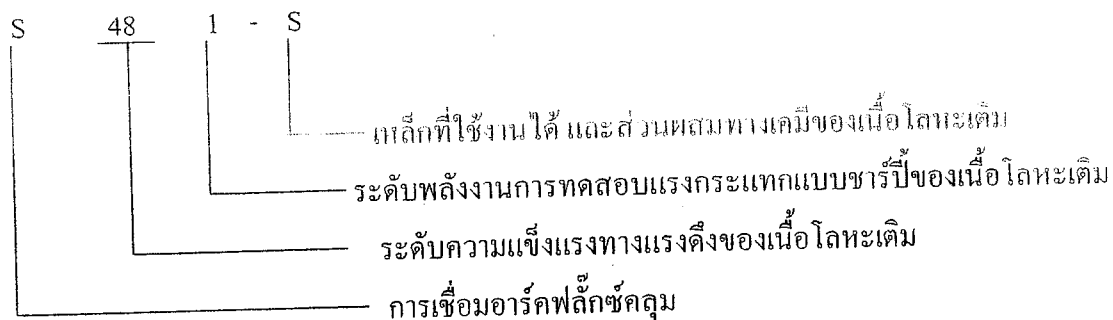
การแบ่งประเภท	ชนิด
FS – FG1	ฟลักซ์ชนิดหลอม
FS – FG2	
FS – FG3	
FS – FG4	
FS – FP1	ฟลักซ์ชนิดหลอม (ชนิดโปร่ง)
FS – BN1	ฟลักซ์ชนิดกาวประสาน
FS – BN2	
FS – BT1	ฟลักซ์ชนิดกาวประสาน (ชนิดผงเหล็ก)
FS – BT2	



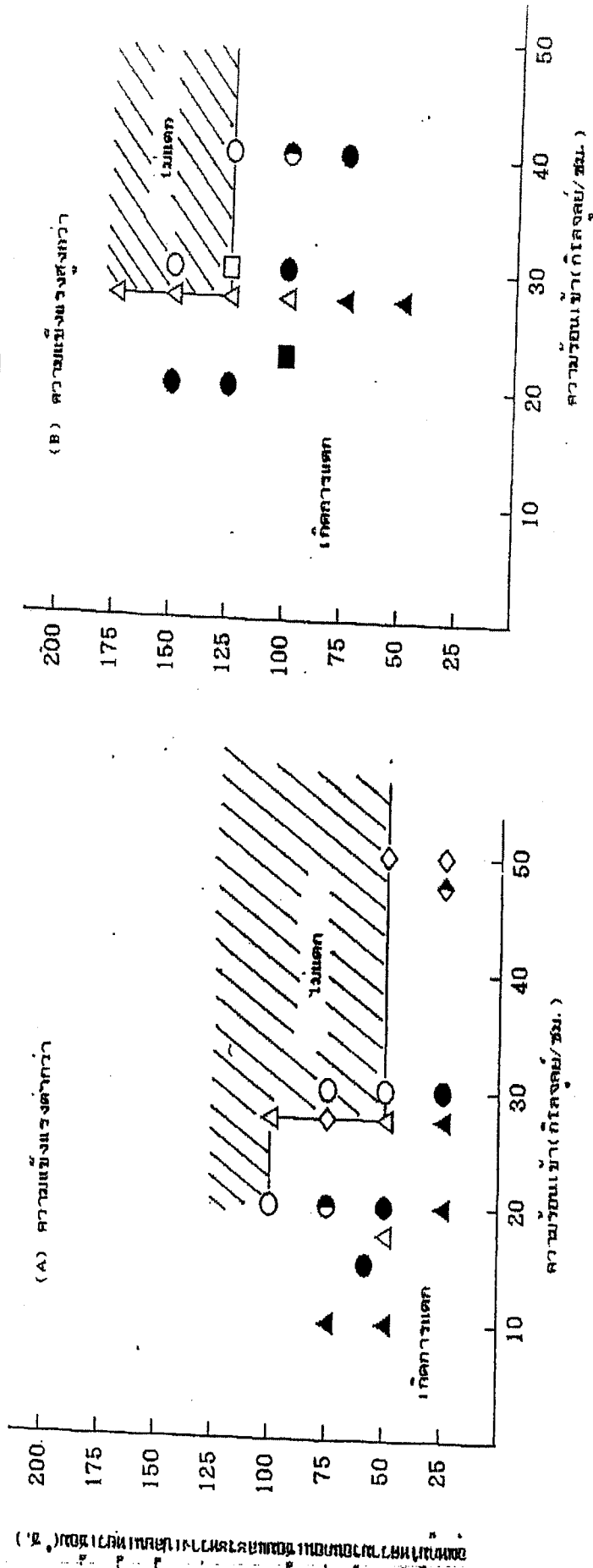
ตารางที่ 4.17 การแบ่งประเภทของโลหะเติม (JIS Z 3183)

การแบ่งประเภท	การใช้งาน
S42X-S	เหล็กถมนูน
S50X-H	เหล็กกล้าทนแรงดึงสูง
S58X-H	
S62X-HX	
S70X-HX	
S80S-HX	
SXXX-M	เหล็กกล้าต้านทานความร้อน
SXXX-CM	
SXXX-1CM	
SXXX-2CM	
SXXX-3CM	
SXXX-5CM	
SXXX-MN	เหล็กกล้าต้านทานการกัดกร่อนในบรรยากาศ
S50X-AX	
S58X-AX	

หมายเหตุ : ตัวอย่างของตัวย่อ



วามแตก	แตกน้อยกว่า 3 มม.กว่า 3 มม.	แตกมากกว่า 3 มม.	ความหนา (มม.)	ชั้นครอบคอนกรีต
○	●	●	50	วบจ-ย
△	▲	▲	25	วบจ-ว
□	■	■	40	วบจ-ว
◇	◆	◆	50	ช่องกักตัว



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบการแตกร้าวเป็นรอยร้าวชนิด F11A6-EG-G โดยการเชื่อมอาร์คเหล็กชุดหลายชั้นเชื่อม

ตารางที่ 4.18 มาตรฐานของสัณฐานเชื่อมเหล็กเชื่อมและเหล็กความแข็งแรงสูงสำหรับการเชื่อมแม่เหล็ก (JIS Z 3313-83)

การบ่งชี้	ส่วนสพทางเคมีของเส้นลวดเชื่อม (%)										สมบัติทางกลของเนื้อโลหะเดิม						
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Ti+Zr	ก๊าซคลุม	ค่าแรงดึง กก.แรง /มม. <sup>2</sup> (นิวตัน/มม. <sup>2</sup> )	จุดคราก : กก.แรง /มม. <sup>2</sup> (นิวตัน/มม. <sup>2</sup> )	ค่ายืด (%)	อุณหภูมิ (°ซ)	ค่ากระแทก รอยบาก V 2มม. กก.แรง-ม. (จูลย์)
YGW 11	≤0.15	0.55~1.10	1.40~1.90	≤0.030	≤0.030	≤0.50	-	-	-	≤0.10	≤0.30	CO <sub>2</sub>	≥50(490)	≥40(390)	≥22	9	≥4.8(47)
YGW 12	≤0.15	0.55~1.10	1.25~1.90	≤0.030	≤0.030	≤0.50	-	-	-	-	-	CO <sub>2</sub>				0	≥2.8(27)
YGW 13	≤0.15	0.55~1.10	1.35~1.90	≤0.030	≤0.030	≤0.50	-	-	-	0.10~0.50	≤0.30	CO <sub>2</sub>				0	≥2.8(27)
YGW 14	≤0.15	-	-	≤0.030	≤0.030	≤0.50	-	-	-	-	-	CO <sub>2</sub>				0	≥2.8(27)
YGW 15	≤0.15	0.40~1.00	1.00~1.60	≤0.030	≤0.030	≤0.50	-	-	-	≤0.10	≤0.13	90 Ar-20 CO <sub>2</sub>	≥50(490)	≥40(390)	≥22	-20	≥4.8(47)
YGW 16	≤0.15	0.40~1.00	0.85~1.60	≤0.030	≤0.030	≤0.50	-	-	-	-	-	80 Ar-20 CO <sub>2</sub>				-20	≥2.8(27)
YGW 17	≤0.15	-	-	≤0.030	≤0.030	≤0.50	-	-	-	-	-	90 Ar-20 CO <sub>2</sub>	≥43(420)	≥35(340)	≥19	-20	≥2.8(27)
YGW 21	≤0.15	0.50~1.10	1.30~2.60	≤0.025	≤0.025	≤0.50	-	-	≤0.60	≤0.10	≤0.30	CO <sub>2</sub>	≥58(570)	≥50(490)		-5	≥4.8(47)
YGW 22	≤0.15	-	-	≤0.025	≤0.025	≤0.50	-	-	-	-	-	CO <sub>2</sub>				-5	≥2.8(27)
YGW 23	≤0.15	0.30~1.00	0.90~2.30	≤0.025	≤0.025	≤0.50	≤1.80	≤0.70	≤0.65	-	≤0.20	80 Ar-20 CO <sub>2</sub>			-20	≥4.8(47)	
YGW 24	≤0.15	-	-	≤0.025	≤0.025	≤0.50	-	-	-	-	-	80 Ar-20 CO <sub>2</sub>	-20	≥2.8(27)			

ตารางที่ 4.19 มาตรฐานของเส้นลวดไฟฟ้าสำหรับเหล็กถลุงและเหล็กความแข็งแรงสูง 50 กก.แรง/mm<sup>2</sup> (JIS Z 3313-82)

การแบ่งชนิด		การควบคุม	ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเติม (%)							คุณสมบัติทางกลของเนื้อโลหะเติม			
			C	Si	Mn	P	S	Al	Ni	ค่าแรงดึง กก.-แรง/มม. <sup>2</sup> นิวตัน/มม. <sup>2</sup>	จุดคราก (0.2% ความแข็งแรง) กก.-แรง/มม. <sup>2</sup> (นิวตัน/มม. <sup>2</sup> )	ค่ายืด (%)	ค่าการกระแทก (0 °C, ร้อยบาท V 2 มม.) กก.-แรง-ม. (จูลส์)
ประเภท I	ชนิด 1	YFW11	≤0.20	≤0.50	≤1.20	≤0.030	≤0.040	≤2.0	≤2.0	≥43(420)	≥35(340)	≥22	≥2.8(27)
	2	YFW12	—	—	—	≤0.030	≤0.040	—	—	≥50(490)	—	—	—
	3	YFW13	≤0.25	≤0.50	≤1.50	≤0.030	≤0.040	≤2.0	≤2.0	≥50(490)	≥40(390)	≥22	≥2.8(27)
	4	YFW14	≤0.20	≤0.50	≤1.50	≤0.030	≤0.040	≤2.0	≤2.0	≥50(490)	≥40(390)	≥22	≥4.8(47)
ประเภท II	ชนิด 1	YFW21	≤0.20	≤0.90	≤1.50	≤0.030	≤0.040	—	—	≥43(420)	≥35(340)	≥22	≥2.8(27)
	2	YGW22	—	—	—	≤0.030	≤0.040	—	—	≥50(490)	—	—	—
	3	YFW23	≤0.20	≤0.90	≤2.00	≤0.030	≤0.040	—	—	≥50(490)	≥40(390)	≥22	≥2.8(27)
	4	YFW24	≤0.20	≤0.90	≤2.00	≤0.030	≤0.040	—	—	≥50(490)	≥40(390)	≥22	≥4.8(47)
ประเภท III	ชนิด 1	YFW31	—	—	—	≤0.030	≤0.040	—	—	≥43(420)	≥35(340)	≥22	≥2.8(27)
	2	YFW32	—	—	—	≤0.030	≤0.040	—	—	≥50(490)	—	—	—
	3	YFW33	—	—	—	≤0.030	≤0.040	—	—	≥50(490)	≥40(390)	≥22	≥2.8(27)
	4	YFW34	—	—	—	≤0.030	≤0.040	—	—	≥50(490)	≥40(390)	≥22	≥4.8(48)

ตารางที่ 4.20 แนวทางการเลือกเส้นลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมอาร์คไฟฟ้าของกลุ่มเหล็กความแข็งแรงสูง

ชนิดของเหล็ก	ข้อควรค่า	จำพวก AIS	จำพวก AWS	กำหนดโดยทั่วไป	แนวการเชื่อม
HT50	MG-50	YCW 11	ER70S-G	C02	F, H, HF
	MG-51T	YCW 12	ER70S-6	C02	ทุกแนว
	MIX-50	YCW 16	ER70S-3	80%Ar + 20%C02	ทุกแนว
	DW-100	YFW 24	E71T-1	C02	ทุกแนว
	MX-100	YFW 24	E70T-1	C02	F, HF
	MG-60	YCW 21	ER80S-G	C02	F, V
HT60	DW-60	YFW 26	E81T1-Ni1	C02	ทุกแนว

หมายเหตุ : แนวการเชื่อม : F = แนวราบ, H = แนวระดับ, HF = แนวระดับต่อนาก, V = แนวตั้งขึ้น

หมายเหตุ : แนวการเชื่อม : F = แนวราบ, H = แนวระดับ, HF = แนวระดับต่อนาก, V = แนวตั้งขึ้น

ตารางที่ 4.21 แท่งและเส้นลวดเชื่อมในการเชื่อมพิกัดสำหรับเหล็กอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าเกรดต่ำ (JIS Z 3316-83X)

ชนิดโลหะ	ส่วนต่อทางเชื่อมของเหล็กอะลูมิเนียม (ต่อ)													คุณสมบัติทางกลของโลหะเชื่อม				PHT	
	C	Si	Mn	P	S	(I) Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Ti	Zr	Others	T.S (kgf/mm <sup>2</sup> ) (N/mm <sup>2</sup> ) min.	Y.S (kgf/mm <sup>2</sup> ) (N/mm <sup>2</sup> ) min.	E1 (%) min.	การตรวจพบ		
																	ความเค้น (%)		ความยาว (kgf/m) (J)
YG150	0.15 max	1.00 max	1.90 max	0.030 max	0.030 max	0.50 max	-	-	-	0.15 max	0.15 max	0.12 max	0.50 max	50 (490)	40 (390)	22	0	4.8 (47)	As-weld
YG160	0.15 max	1.00 max	2.00 max	0.025 max	0.025 max	0.50 max	1.80 max	0.70 max	0.65 max	-	Ti+Zr 0.20max	-	0.50 max	60 (590)	45 (440)	17	-20	4.0 (39)	As-weld
YG162	0.15 max	1.00 max	2.25 max	0.025 max	0.025 max	0.50 max	1.80 max	0.70 max	0.65 max	-	Ti+Zr 0.20max	-	0.50 max	62 (610)	51 (500)	17	-20	4.0 (39)	As-weld
YG170	0.15 max	0.80 max	2.25 max	0.025 max	0.025 max	0.50 max	2.60 max	0.60 max	0.65 max	-	-	-	0.50 max	70 (690)	56 (550)	16	-20	4.0 (39)	As-weld
YG180	0.15 max	0.80 max	2.25 max	0.025 max	0.025 max	0.50 max	3.80 max	0.60 max	0.90 max	-	-	-	0.50 max	80 (790)	68 (670)	15	-20	4.0 (39)	As-weld
YG17M	0.05 -0.15	0.80 max	2.00 max	0.025 max	0.025 max	0.40 max	-	-	0.40 -0.65	-	-	-	0.50 max	50 (480)	40 (390)	25	0	4.8 (47)	620 ± 15°C x 1hr FC
YG17NL	0.05 max	0.80 max	1.60 max	0.025 max	0.025 max	0.40 max	-	-	0.40 -0.65	-	-	-	0.50 max	42 (410)	21 (210)	25	0	4.8 (47)	620 ± 15°C x 1hr FC
YG17CH	0.05 -0.15	0.80 max	1.60 max	0.025 max	0.025 max	0.40 max	-	1.00 -1.50	0.40 -0.65	-	-	-	0.50 max	57 (560)	47 (460)	19	0	4.8 (47)	690 ± 15°C x 1hr FC
YG17CHL	0.05 max	0.80 max	1.60 max	0.025 max	0.025 max	0.40 max	-	1.00 -1.50	0.40 -0.65	-	-	-	0.50 max	53 (520)	32 (310)	20	0	4.8 (47)	690 ± 15°C x 1hr FC
YG12CH	0.05 -0.15	0.80 max	1.60 max	0.025 max	0.025 max	0.40 max	-	2.00 -2.70	0.90 -1.20	-	-	-	0.50 max	64 (630)	54 (530)	17	0	4.8 (47)	690 ± 15°C x 1hr FC
YG12CHL	0.05 max	0.80 max	1.60 max	0.025 max	0.025 max	0.40 max	-	2.00 -2.70	0.90 -1.20	-	-	-	0.50 max	53 (520)	32 (310)	20	0	4.8 (47)	690 ± 15°C x 1hr FC
YG13CH	0.15 max	0.80 max	1.60 max	0.025 max	0.025 max	0.40 max	-	2.70 -3.50	0.90 -1.20	-	-	-	0.50 max	64 (630)	54 (530)	17	0	4.8 (47)	690 ± 15°C x 1hr FC
YG15CH	0.15 max	0.80 max	1.60 max	0.025 max	0.025 max	0.40 max	-	4.00 -6.00	0.45 -0.65	-	-	-	0.50 max	50 (490)	30 (290)	18	0	4.8 (47)	740 ± 15°C x 1hr FC

หมายเหตุ (1) ปริมาณของแก๊สรวมในแก๊สของเหล็กอะลูมิเนียม

(max. = ค่าสูงสุด, min. = ค่าต่ำสุด, hr. = ชั่วโมง, FC. = เย็นในเตา, AS-weld = เติมน้ำเชื่อม)

(kgf/mm<sup>2</sup> = กก.แรง/มม<sup>2</sup>), N/mm<sup>2</sup> = นิวตัน/มม<sup>2</sup>, kgf-m = กก.แรง-ม.)

## บทที่ 5

### การเชื่อมพอกผิวแข็ง และการเชื่อมซ่อมแซม (Hardsurfacing and Repair Welding)

#### 5.1 ผลดีของการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Merits of hardsurfacing)

ข้อดีของการเชื่อมพอกแข็งชิ้นส่วนเครื่องจักรกลมีดังต่อไปนี้คือ

- 1) ง่ายต่อการใช้โลหะเติมที่แข็งมากๆ และธาตุเจือที่ต้านทานการสึกหรอ
- 2) อายุการใช้งานนานขึ้น และเพิ่มความต้านทานการสึกหรอและการกัดกร่อน
- 3) ใช้ชิ้นส่วนที่มีราคาแพงได้อย่างประหยัด
- 4) ใช้งานได้ในทันที

คุณภาพของเนื้อโลหะเติมที่พอกผิวหน้าอาจจะแปรเปลี่ยนไปอย่างมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับลำดับขั้นตอนของการเชื่อม, ผิวหน้าของวัสดุ และความชำนาญของช่างเชื่อม เพื่อที่จะให้ได้ผลดีอย่างแท้จริงของการเชื่อมพอกผิว เราจึงควรวิเคราะห์ถึงชนิดของการสึกหรอและการเลือกและตามด้วยการใช้กรรมวิธีการเชื่อมกับโลหะเติมให้เหมาะสมที่สุด

#### 5.2 การสึกหรอแบบต่างๆ ของโลหะ (Various wears of metal)

การสึกหรอเป็นปรากฏการณ์ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายแก่ผิวหน้า เนื่องจากความสัมพัทธ์ การเคลื่อนที่ระหว่างผิวหน้า และวัสดุบางอย่างที่มาสัมผัสในทางปฏิบัติ การสึกหรอที่แตกต่างกัน บางชนิดสามารถที่จะเกิดได้ในเวลาเดียวกัน และนั่นก็เป็นเหตุผลว่าทำไมการวิเคราะห์การสึกหรอ จึงดูเหมือนว่าเป็นสิ่งที่ยาก การสึกหรอจะถูกเกี่ยวข้องกับด้วยหลายๆ สิ่ง (factor) และเป็นการยากมากที่จะทำให้แจ่มชัดถึงสาเหตุที่แท้จริง และยากที่จะรู้ว่าสิ่งใดจะมีส่วนร่วมด้วยมากที่สุด และถึงแม้ว่าสิ่งนั้นสามารถที่จะตรวจดูได้ ก็ยังเป็นการยากอีกที่จะรู้ว่าปริมาณของแต่ละสิ่งที่มีอิทธิพลต่อการสึกหรอนั้นมีมากน้อยเพียงใด ชนิดของการสึกหรอสามารถที่จะแบ่งได้ตามตารางที่ 5.1 ตามลักษณะกลไกของการสึกหรอ รูปที่ 5.1 ถึง รูปที่ 5.6 แสดงพื้นฐานเบื้องต้นของการสึกหรอต่างๆ

สมมุติในการสึกหรอระหว่างข้อต่อ (track-link) และลูกกลิ้ง (roller) ของรถปราบดิน (Bulldozer) เป็นตัวอย่างจริงๆ เมื่อผิวหน้าของข้อต่อและลูกกลิ้งสัมผัสซึ่งกันและกันในการทำงาน การสึกหรอแบบเกาะติด (adhesive wear) ก็จะเกิดขึ้นบนผิวหน้าแต่ละอัน แต่ชิ้นส่วนทั้งสองจะไม่สัมผัสกันเสมอไปด้วยผิวโลหะ เพราะว่าเศษของดินอาจจะเข้าไปอยู่ในระหว่างผิวสัมผัสโลหะนั้น ในกรณีเช่นนี้ผิวหน้าทั้งสองก็จะเกิดการสึกหรอแบบบด (grinding wear) โดยดินที่แทรกเข้าไปเกิดความเค้นอย่างมาก เมื่อข้อต่อและลูกกลิ้งได้รับแรงกระแทกซ้ำแล้วซ้ำอีกเนื่องจากเงื่อนไขการ



ทำงาน ทำให้การสึกหรอแบบกระแทกความล้าสามารถเกิดขึ้นบนผิวหน้า จากที่กล่าวไว้ข้างต้น การสึกหรอแบบเกาะติด, การสึกหรอแบบบด และการสึกหรอแบบกระแทกความล้า จึงสามารถเกิดขึ้นได้บนผิวหน้าระหว่างข้อต่อและลูกกลิ้งในเวลาเดียวกัน

เมื่อเราเลือกโลหะเดิมที่ถูกต้องสำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง ผลของการใช้งานจริงๆ ก็จะถูกนำมาอ้างอิง ทั้งนี้ก็เพราะว่าจะได้รู้ถึงความสามารถในการนำไปใช้งานของโลหะเดิม เนื่องจากเป็นการยากมากที่จะรู้โลหะเดิมที่เหมาะสมที่สุด และการรู้ว่าการสึกหรอชนิดใดที่ครอบงำการสึกหรอมากที่สุด เมื่อการสึกหรอแบบต่างๆ เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน เราควรมีขั้นตอนการตัดสินใจเลือกโลหะเดิมให้ถูกต้องโดยการวิเคราะห์ผลของการสึกหรอในการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการ และการใช้งานจริงๆ

### 5.3 ความสามารถในการเชื่อมของโลหะชิ้นงาน (Weldability of base metal)

โดยทั่วไป วัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจะมีความต้านทานการสึกหรอและมีความสามารถในการเชื่อมที่ต่ำ แม้ว่าในบางกรณีที่สามารถเชื่อมได้ดีเช่น เหล็กกล้าเชื้อคาร์บอนต่ำ จะถูกใช้ทำเป็นชิ้นส่วนก่อนที่จะคิดถึงเรื่องการเชื่อม ตารางที่ 5.2 แสดงรายละเอียดของเหล็กกล้าโดยทั่วไปที่ใช้สำหรับทำเครื่องจักรใช้กำลัง (Power shovels) และรถปราบดิน (bulldozers) และจำเป็นต้องทำการอุ่นหรือให้ความร้อนก่อนการเชื่อมเพื่อป้องกันการแตกร้าวในการเชื่อม

เหล็กกล้าจะเปราะเมื่อคาร์บอนและธาตุเจือต่างๆ เพิ่มขึ้น หรือการเพิ่มขึ้นของความแข็ง คาร์บอนเทียบเท่า ( $C_{eq} = C + 1/6Mn + 1/24Si + 1/15Ni + 1/5Cr + 1/4Mo$ ) เป็นหนึ่งในหลายแฟกเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดอิทธิพลของธาตุเจือเหล่านี้ต่อความจริง และแฟกเตอร์อื่นๆ ก็คือ ความหนาของโลหะชิ้นงานหรืออัตราการใช้ความร้อน ค่าประมาณอย่างหยาบๆ ของความแข็งสูงสุดของบริเวณกระทบร้อนสามารถคำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$H_{max} (Hv) = 666 \times C_{eq} + 40$$

คาร์บอนเทียบเท่าของเหล็กกล้าที่ใช้สำหรับเครื่องจักรกลการก่อสร้างมีค่าประมาณ 0.6-0.7 ดังนั้น ค่าความแข็งสูงสุดของ HAZ สามารถประมาณค่าได้ประมาณ 450-500 HV. ความเย็นไปเริ่มแรกของการแตกร้าวที่เพิ่มขึ้นเมื่อความแข็งวิกเกอร์ของ HAZ มีค่ามากกว่า 350 ความแข็งของ HAZ สามารถควบคุมได้โดยการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมเพื่อลดความเร็วในการเย็นตัวลง เราควรจะทราบว่า การลดลงของความแข็งที่ HAZ จนน้อยกว่า 350 Hv เป็นการป้องกันการแตกร้าวใต้ตะเข็บเชื่อม (underbead crack)

รอยแตกร้าวในรอยเชื่อมนี้มีสาเหตุมาจากไฮโดรเจนที่แทรกซึมในโลหะรอยเชื่อมทำให้เพิ่มการแข็งตัวขึ้น เมื่อไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้นการแตกร้าวก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ในการเชื่อมเหล็กกล้าที่มีความสามารถแข็งตัวได้ ควรเลือกใช้อิเล็กโทรดไฮโดรเจนต่ำเพื่อลดปริมาณไฮโดรเจนในโลหะรอยเชื่อม

#### 5.4 ความต้านทานของโลหะต่อการสึกหรอ

(Resistance of the metal to wearing)

##### 5.4.1 ความต้านทานต่อการสึกหรอแบบเกาะติด

(Resistance to adhesive wear)

การสึกหรอแบบเกาะติดโดยทั่วไปจะเป็นการสึกหรอของโลหะต่อโลหะ เป็นการยากที่จะบ่งชี้โดยง่ายว่าวัสดุอะไรมีความต้านทานอย่างยอดเยี่ยมต่อการสึกหรอแบบเกาะติด การสึกหรอแบบเกาะติดถูกกระบวนว่าประกอบด้วยการสึกหรอทางกลที่แตกต่างกันหลายชนิด ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระกรรม (load) และอัตราการสึกหรอต่อการสึกหรอแบบเกาะติดของโลหะต่าง ๆ แสดงอยู่ในรูปที่ 5.7 การสึกหรอมักจะเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มของภาระกรรม แต่การสึกหรอแบบเกาะติดจะถูกเพิ่มในทันทีเมื่อมีการถ่ายเทภาระกรรมในช่วง A ในรูปที่ 5.7 เรียกว่า การสึกหรอเบาบาง (light wear) และในช่วง B ถูกเรียกว่า การสึกหรอหนัก (heavy wear) การถ่ายเทภาระกรรม หรือแรงดันการสัมผัสระหว่าง A และ B ถูกเรียกว่าการถ่ายเทแรงดัน (transition pressure) การถ่ายเทแรงดันนี้จะใกล้เคียงกับความเค้นจุดครากของโลหะที่อ่อนกว่า

ปริมาณของการสึกหรอสามารถถูกบังคับโดยกฎของโฮล์ม (Holm's law) ในกรณีของการสึกหรอเบาบาง ดังนี้ :-

$$W = (K/P_m) \times p$$

W = ปริมาณการสึกหรอ

K = ค่าคงที่

P<sub>m</sub> = แรงดันจุดคราก

P = ภาระกรรม (load)

เราสามารถเห็นว่าวัสดุที่มีค่า P<sub>m</sub> สูงกว่า ซึ่งเป็นวัสดุแข็งแกร่งกว่าจะมีความต้านทานการสึกหรอได้สูงกว่า เมื่ออุณหภูมิของผิวหน้าสัมผัสสูงขึ้นพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของภาระกรรมและความเร็วการเสียดทาน จะทำให้ความแข็งของผิวหน้าลดลงเป็นสาเหตุให้เกิดผลเสียต่อการต้านทาน

การสึกหรอ โลหะซึ่งไม่ได้ลดความแข็งโดยการเพิ่มอุณหภูมิสามารถกล่าวได้ว่าดีสำหรับการต้านทานการสึกหรอ

ขอบเขตการแปรรูปอย่างถาวร (plastic deformation regions) ของบริเวณเล็ก ๆ ของพื้นที่ที่ถูกเสียดสีจะถูกทำให้เพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มของภาระกรรม (loading) และตามด้วยความเร่งในการสึกหรอ ซึ่งการแตกร้าวจากการล้าตัวและการสึกหรอแบบเกาะติดก็จะดำเนินต่อไป นั่นก็เป็นเพราะว่าการสึกหรอจะถูกถ่ายเทจากการสึกหรอที่เบาบางไปสู่การสึกหรอที่รุนแรง เมื่อภาระกรรมและความเร็วในการเสียดทานถูกเพิ่มมากขึ้น ต่อมาอุณหภูมิของผิวหน้าก็เพิ่มขึ้น และผิวหน้าที่สึกหรอก็รวมตัวกับออกซิเจนเพิ่มขึ้นด้วย และเป็นผลทำให้การสึกหรอแบบเกาะติดลดลง เพราะว่าชั้นของ  $v$  ออกไซด์สามารถหล่อลื่นผิวหน้าที่สัมผัสได้ จากการเกิดขึ้นของการรวมตัวกับออกซิเจนหรือการออกซิไดเซชัน (oxidization) การถ่ายเทแรงดันก็จะเพิ่มขึ้น และรูปแบบของการสึกหรอก็จะถ่ายเทจากการสึกหรอที่รุนแรงไปสู่การสึกหรอที่เบาบาง

รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเสียดทานและปริมาณการสึกหรอของชิ้นงานทดสอบ ภายใต้แรงดันการสัมผัสที่คงที่บนแผ่นหมุน ในขอบเขตของเงื่อนไข A รูปแบบการสึกหรอที่รุนแรงจะเกิดขึ้น ส่วนในเงื่อนไข B รูปแบบของการสึกหรอที่เบาบางจะเกิดขึ้น จากรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงที่แบบของการสึกหรอที่เบาบางจะเกิดขึ้น จากรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงที่แบบของการสึกหรอที่เบาบางจะเกิดขึ้น จากรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้องไม่ได้เป็นตัวกำหนดความต้านทานการสึกหรอในรูปแบบการสึกหรอที่รุนแรง

#### 5.4.2 ความต้านทานการขัดถูแบบเซาะและแบบครูด

(Resistance to erosion and scratching abrasion)

ความแข็งเป็นส่วนหนึ่งที่ป้องกันการขัดถูแบบเซาะและแบบครูด ในรูปที่ 5.9 แสดงอัตราส่วนการสึกหรอของรอยเชื่อมพอกผิวแข็งหลาย ๆ ชนิด ภายใต้การทดสอบด้วยการโบรันดัมแบบเปียก (wet-carborundum-stirring test) การทดสอบนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับการสึกหรอแบบเซาะและแบบครูด และผลการทดสอบจะบอกเราว่าโลหะอะไรมีความต้านทานการขัดถูแบบครูดดีที่สุด

ในขณะที่โดยทั่ว ๆ ไปมีความสัมพันธ์กันระหว่างความแข็งกับความต้านทานในการขัดถู แต่ความแข็งก็ไม่สามารถบ่งชี้ได้เสมอไป ที่กล่าวเริ่มแรกว่าโลหะที่มีความแข็งมากกว่าจะมีความต้านทานการขัดถูได้ดีกว่า แต่ความแข็งก็ไม่ได้เป็นเพียงแฟกเตอร์เดียวเท่านั้น โครงสร้างของโลหะจะให้อิทธิพลอย่างมากซึ่งสามารถเห็นได้จากรูปที่ 5.9 ซึ่งชนิดโครเมียมสูงและชนิดทั้งสแตนคาร์ไบด์จะมีความต้านทานการสึกหรอชนิดนี้อย่างมาก

### 5.4.3 ความต้านทานต่อการขัดถูแบบบด

(Resistance to grinding abrasion)

รูปที่ 5.10 แสดงอัตราส่วนการสึกหรอของรอยเชื่อมพอกผิวแข็งที่แตกต่างกัน ภายใต้แรงดันบนแผ่นหมุนแกรไนท์ จากรูปจะแสดงอัตราส่วนการสึกหรอของรอยเชื่อมชนิด ทังสเตนคาร์ไบด์และชนิดโครเมียมสูง ซึ่งจะมากกว่าชนิดเพิร์ลไลต์ประมาณ 2/5 ผลการทดสอบนี้ จะเหมือนกับการขัดถูแบบบด

### 5.4.4 ความต้านทานการขัดถูแบบสกัดและการสึกหรอแบบกระแทก

(Resistance to gouging abrasion and impact wear)

การขัดถูแบบสกัดและการสึกหรอแบบกระแทกมีสาเหตุมาจากการใช้ภาระกรรมซ้ำแล้วซ้ำ อีกในทางแรงอัดที่สูงมาก ความสามารถในการต้านทานการขัดถูแบบสกัดต้องการความอ่อนตัว และความเหนียวของโลหะมากกว่าความแข็ง และความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบ กระแทกต้องการความอ่อนตัวและความเหนียวมากกว่าการขัดถูแบบสกัด

สำหรับการนำไปใช้งานที่มีการขัดถูแบบนี้ วัสดุที่นิยมใช้กันมากก็คือเหล็กกล้าอสเตน ในติก-มังกานีส เหล็กกล้า 13% มังกานีสโดยทั่ว ๆ ไปมีความต้านทานสูงต่อการขัดถูแบบสกัดทั้งนี้ ก็เพราะว่า เหล็กกล้า 13% มังกานีสมีโครงสร้างเป็นอสเตนในติกที่มีความอ่อนตัวสูงและมีสมบัติ แข็งตัวได้ภายใต้การรับภาระกรรมแบบกระแทกซ้ำแล้วซ้ำอีก ถ้าภาระกรรมแบบกระแทกไม่หนัก มากนักโลหะเชื่อมาร์เทนไซต์ก็สามารถให้ผลในการต้านทานการขัดถูแบบสกัดและการสึกหรอ แบบกระแทก

## 5.5 วัสดุงานเชื่อมล้นเปลือยสำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง

(Welding consumables for hardsurfacing)

วัสดุงานเชื่อมล้นเปลือยมีอยู่หลายชนิดที่ได้ถูกใช้อย่างกว้างขวาง สำหรับการเชื่อมพอกผิว แข็ง ตารางที่ 5.3 แสดงอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ที่กำหนดโดย AISI ตารางที่ 5.4 แสดงอิเล็กโทรดหุ้ม ฟลักซ์ชนิดต่าง ๆ ที่ผลิตโดยบริษัทโกเบสตีล และบทเรียนต่อไปนี้จะกล่าวถึงลักษณะที่สำคัญของ อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์แต่ละชนิด

### 5.5.1 ชนิดเพิร์ลไลติก (Pearlitic type)

อิเล็กโทรดชนิดนี้เริ่มแรกจะมีความแข็งของวิกเกอร์เท่ากับ 350 หรือมีธาตุเจือ โครเมียมและมังกานีสผสมอยู่น้อย และสามารถทำให้เกิดโครงสร้างเพิร์ลไลติกโดยการให้เย็นตัว ลงด้วยอากาศหลังจากการเชื่อม อิเล็กโทรดชนิดเพิร์ลไลติกจะให้ความแข็งที่สูงกว่าและโครงสร้าง

ที่ละเอียดกว่าด้วยการเพิ่มธาตุเจือกายให้อัตราการเย็นตัวในการเชื่อมที่เหมือนเดิม เนื่องจากรอยเชื่อมชนิดนี้สามารถแปรรูปได้ (machinable) เราจึงนำไปใช้กับการเชื่อมพอกผิวแข็งของเพลาลูกกลิ้งรถปราบดิน อย่างไรก็ตามรอยเชื่อมชนิดนี้มีความต้านทานต่อการขัดถูแบบครูดและการขัดถูแบบบดไม่ดีนัก เมื่อเปรียบเทียบกับชนิดมาร์เทนไซต์ิก อิเล็กโตรดชนิดเฟิลร์ไลทิกนี้ไม่ได้ใช้เพียงเฉพาะกับการเชื่อมพอกผิวแข็งเท่านั้นแต่ยังใช้ได้กับการเชื่อมใต้ชั้นเคลือบ (underlaying) ด้วย

รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเชื่อมที่มีต่อความแข็งของโลหะรอยเชื่อมชนิดเฟิลร์ไลทิก ในกรณีของการเชื่อมแบบต่อเนื่อง ความแข็งจะลดต่ำลง เพราะความเร็วในการเย็นตัวจะช้าและโครงสร้างจะตกตะกอนเป็นเฟอร์ไรท์

รูปที่ 5.12 แสดงการกระจายความแข็งตามภาคตัดขวางของโลหะรอยเชื่อมชนิดเฟิลร์ไลทิกเป็นชั้น ๆ บนเหล็กกล้าคาร์บอน ชั้นเชื่อมแรกและชั้นที่สองแสดงความแข็งที่ต่ำกว่าชั้นเชื่อมที่สามและชั้นเชื่อมที่สี่เพราะเป็นผลมาจากการอบคืนตัว และการเจือจางโดยโลหะชั้นงาน ส่วนชั้นที่สามและมากกว่าจะได้ความแข็งตามความต้องการ

โลหะรอยเชื่อมชนิดเฟิลร์ไลทิกสามารถทำให้แข็งได้โดยการอบชุบแข็ง รูปที่ 5.13 และ 5.14 แสดงความแข็งของรอยเชื่อมหลาย ๆ ชนิดที่ผ่านการชุบแข็งแล้ว , และชุบแข็งกับอบคืนตัวแล้ว รูปที่ 5.13 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ประมาณ  $900^{\circ}\text{C}$ .

สารพอกหุ้มจะมีอยู่สองชนิดคือชนิดไฮโดรเจนต่ำ (HF-260 และ HF-350) และชนิดไททาเนียม (HF - 240 และ HF-330) สำหรับในอิเล็กโตรดชนิดเฟิลร์ไลท์ โดยที่อิเล็กโตรดชนิดไททาเนียมจะให้ความสามารถในการทำงานที่ดีกว่าชนิดไฮโดรเจนต่ำ ความสวยงามของตะเข็บเชื่อมและการกำจัดขี้ตะกรันก็ดีกว่าเช่นกัน อย่างไรก็ตามอิเล็กโตรดไททาเนียมต้องการอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนเชื่อมที่สูงกว่าชนิดไฮโดรเจนต่ำเพื่อป้องกันการแตกร้าวได้ตะเข็บเชื่อมที่เกิดจากไฮโดรเจนที่แทรกซึมเข้าไป อิเล็กโตรดชนิดไฮโดรเจนต่ำจะให้ความต้านทานการแตกร้าวที่ดีกว่า แต่ไม่มีความแตกต่างในความสามารถการสึกหรอระหว่างอิเล็กโตรดชนิดไฮโดรเจนต่ำและอิเล็กโตรดชนิดไททาเนียม

### 5.5.2 ชนิดมาร์เทนไซต์ิก (Martensitic type)

โลหะรอยเชื่อมชนิดนี้จะให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ิกเมื่อให้เย็นตัวลงในอากาศธาตุเจือของโลหะกลุ่มนี้โดยพื้นฐานแล้วประกอบด้วยเหล็กและคาร์บอน ธาตุทางเคมีอื่น ๆ เช่น มังกานีส, ซิลิกอน และธาตุอื่นอีกเล็กน้อยก็จะมีผสมอยู่ด้วย ธาตุเจือ เช่น โครเมียม นิกเกิล และทังสเตน จะเป็นตัวควบคุมส่วนประกอบของโครงสร้าง (ที่ส่วนใหญ่คือมาร์เทนไซต์และคาร์ไบด์) ซึ่งจะ

เกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัวลงหลังจากการเชื่อมรอยเชื่อม ธาตุเจือเหล่านี้จะต้องใส่อย่างระมัดระวังให้ได้สัดส่วนเพื่อจะได้โครงสร้างที่ต้องการ

โครงสร้างและสมบัติของโลหะรอยเชื่อมสามารถแปรเปลี่ยนไปตามวิธีการเชื่อมและอัตราการเย็นตัว โลหะรอยเชื่อมมาร์เทนไซต์มักจะแข็งและต้านทานการกัดกร่อนแบบครูด และการตัดโดยทรายกับกรวดที่มีความเค้นต่ำ แต่ว่าโลหะนี้จะเปราะและต้านทานการกัดกร่อนแบบกระแทกไม่ดัด ความต้านทานแบบเจาะและแบบครูดขึ้นอยู่กับปริมาณความใหญ่และความแข็งของส่วนประกอบคาร์ไบด์

โลหะรอยเชื่อมชนิดมาร์เทนไซต์มีความแข็งแปรเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวในรูปที่ 5.15 แสดงความแข็งที่สัมพันธ์ไปตามอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนของโลหะรอยเชื่อมชนิดมาร์เทนไซต์ เมื่อโลหะรอยเชื่อมมาร์เทนไซต์ได้รับการขัดถูด้วยความเค้นสูง ความแข็งของมันจะลดลงเนื่องจากความร้อนจากการเสียดทาน ทั้งนี้เพราะว่ารอยเชื่อมถูกอบคืนตัว ดังนั้นความแข็งที่ผ่านการอบคืนตัวแล้วจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ทราบคุณลักษณะความต้านทานการสึกหรอได้ดีเช่นความแข็งของโลหะรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมมาแล้ว รูปที่ 5.16 แสดงความแข็งที่อบคืนตัวแล้วของโลหะรอยเชื่อมมาร์เทนไซต์ รูปที่ 5.17 แสดงการสึกหรอทางปฏิบัติของรอยเชื่อมพอกผิวแข็งมาร์เทนไซต์บนปลายของริปเปอร์ (ripper) ชนิดของการขัดถูในการทดสอบนี้ส่วนใหญ่จะเป็นการขัดถูแบบบดภายใต้ความเค้นขนาดกลาง โดยการขัดถูแบบครูดความเค้นต่ำ, การขัดถูแบบสีกัดและแบบกระแทกที่มีความเค้นสูง จากรูปจะบอกเราว่าอิเล็กโทรดชนิด HF-650 แสดงความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ดีที่สุด

โลหะรอยเชื่อมมาร์เทนไซต์ยังมีชนิดอื่น ๆ อีกซึ่งมีโครงสร้างอสเทนไนต์ในทิกที่เสถียร (stable) เราให้ชื่อว่าชนิดเซมิออสเทนไนต์ (Semi-austenite) ซึ่งจะมีส่วนผสมของมาร์เทนไซต์และอสเทนไนต์ที่เสถียร เนื่องจากรอยเชื่อมชนิดนี้มีออสเทนไนต์จำนวนมาก จึงทำให้มีข้อเสียทางด้านความแข็งและข้อด้อยทางด้านความสามารถในการอ่อนตัวมากกว่าโลหะรอยเชื่อมชนิดมาร์เทนไซต์ธรรมดา ดังนั้นมันจึงมีความต้านทานอย่างดีต่อการสึกหรอแบบเกาะติดและแบบสีกัด แต่ไม่ดีด้านความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบครูดและแบบเจาะ รูปที่ 5.18 แสดงความแข็งของโลหะรอยเชื่อมเซมิออสเทนไนต์ที่มีค่าตามอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมรูปที่ 5.19 แสดงความแข็งที่กระจายตัวของรอยเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็กอะลูมิเนียม อุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมที่ 200°C. หรือการเชื่อมข้างใต้ (under-layer) ด้วยอิเล็กโทรดไฮโดรเจนต่ำมีความจำเป็นสำหรับการเชื่อมเพื่อที่จะป้องกันการแตกร้าวรอบ ๆ บริเวณหลอมละลาย

รูปที่ 5.20 แสดงความแข็งของโลหะรอยเชื่อมเซมิออสเทนไนต์ที่อบคืนตัวแล้ว โดยเปรียบเทียบกับเหล็กกล้ามาร์เทนไซต์ รูปที่ 5.21 แสดงผลของการทดสอบการสึกหรอแบบ

เกาะติด HF-600 และ HF-12 แสดงแนวโน้มต่างกันในการสึกหรอแบบนี้ โลหะรอยเชื่อม HF-12 เหมาะสมที่จะถูกออกซิไดซ์โดยความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานที่ผิวหน้าในการเพิ่มความยาวที่เกิดขึ้นของชั้นออกไซด์บนผิวหน้าที่สัมผัสกันของการทดสอบการสึกหรอ และรูปแบบการสึกหรอจะถูกเปลี่ยนจากการสึกหรอรุนแรงเป็นการสึกหรอบาง HF-600 ยากที่จะเกิดการออกซิเดชันขึ้นที่ผิวหน้า ดังนั้นจึงมีการสึกหรอที่รุนแรงตลอดการทดสอบ

### 5.5.3 ชนิดโบรอน-มาร์เทนไซต์ (Boron – martensitic Type)

โบรอน-มาร์เทนไซต์จะให้ความแข็งแรงได้สูงถึง 800 วิกเกอร์ เนื่องจากโครงสร้างมีผลด้วยโบไรด์ และสารละลายโบไรด์-คาร์ไบด์ในพื้นผิวของมาร์เทนไซต์คาร์บอนสูง โดยชนิดนี้จะดีในด้านการต้านทานการขัดถูแบบบดด้วยความเค้นต่ำ และการขัดถูแบบครูด อย่างไรก็ตามมันจะมีความต้านทานการขัดถูแบบบดด้วยความเค้นต่ำเนื่องจากความเปราะของมัน ความแข็งแรงของโลหะชนิดนี้แปรเปลี่ยนไปโดยขึ้นอยู่กับวิธีดำเนินการเชื่อมแต่จะมีผลเพียงเล็กน้อยจากการเจือจางของโลหะขึ้นงานและความเร็วในการเย็นตัว

รูปที่ 5.22 แสดงความแข็งแรงของโลหะรอยเชื่อมโบรอน-มาร์เทนไซต์ที่อบคืนตัวแล้ว รูปที่ 5.22 แสดงผลของการทดสอบความต้านทานการขัดถูแบบของโลหะรอยเชื่อมหลาย ๆ ชนิดที่มีต่อแกรไนท์ โลหะรอยเชื่อมชนิดโบรอน-มาร์เทนไซต์จะมีข้อดีมากกว่าชนิดมาร์เทนไซต์โดยทั่ว ๆ ไป และมีข้อด้อยกว่าชนิดทั้งสเตนคาร์ไบด์ และชนิดโครเมียมสูงไม่มากนัก

ตารางที่ 5.5 แสดงอัตราการสึกหรอของโลหะรอยเชื่อมโบรอน – มาร์เทนไซต์ และรอยเชื่อมมาร์เทนไซต์โดยทั่วไปที่ถูกการขัดถูแบบเซาะและแบบครูดด้วยความเค้นต่ำ ซึ่งนั่นก็คือ อัตราความต้านทานการสึกหรอเวท-คาร์บอรัมดัม (wet-carborundum)

### 5.5.4 ชนิดมังกานีสออสเทนไนติก (Manganese austenitic type)

อิลีคโทรดชนิดมังกานีสออสเทนไนติกจะมีมังกานีสผสมอยู่ 13% และมีสมบัติที่ขดเยิ้มในด้านความสามารถในการอ่อนตัวและมีการแข็งตัวเมื่อใช้งาน ทั้งนี้เนื่องจากมันมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนติกที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นชนิดนี้จึงมีสมบัติที่ดีในการต้านทานการขัดถูแบบกระแทก และการขัดถูแบบสกด และถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางไม่เพียงแต่เฉพาะการซ่อมแซม และการแก้ไขให้นำกลับมาใช้งานได้ของเหล็กหล่อมังกานีสเท่านั้น แต่ยังนำไปใช้ในการเชื่อมพอกผิวหน้าบนโลหะที่ต่างชนิดกันได้

รูปที่ 5.24 แสดงสมบัติทางกลของเหล็กกล้ามังกานีส 13% ที่ถูกทำให้เหนียวโดยน้ำในฟังก์ชันของอุณหภูมิให้ความร้อนที่ รูปที่ 5.25 แสดงการกระจายความแข็งแรงของโลหะรอยเชื่อมเหล็กมังกานีส 13% ที่ผิวหน้าของแต่ละชั้นบนเหล็กละมุน (mild steel)

เนื่องจากเหล็กมังกานีส 13% มีสมบัติการขยายตัวทางความร้อนที่สูง ดังนั้นชั้นโลหะรอยเชื่อมเหล็กมังกานีส 13% ที่อยู่บนเหล็กอะลูมิเนียมจึงสามารถเป็นสาเหตุให้เกิดความแตกร้าวและการไม่ประสานติดกันเนื่องจากมีความเค้นทางความร้อนสูงเกิดขึ้นรอบ ๆ แนวการหลอมละลาย ในการเชื่อมพอกผิวหน้าด้วยโลหะรอยเชื่อมเหล็กมังกานีส 13% นั้น การเชื่อมได้ชั้นเคลือบ (under-laying) ด้วยออสเตนไนติกหรือเหล็กคาร์บอนต่ำจึงถูกแนะนำให้ใช้โลหะรอยเชื่อม 16Mn – 16Cr

เหล็กมังกานีส 13% จะแสดงการแข็งตัวเมื่อใช้งานอย่างน่าทึ่ง ในรูปที่ 5.26 แสดงความแข็งของเหล็กมังกานีส 13% ที่ถูกทำให้เหนียวโดยน้ำภายใต้ภาระกรรมแรงอัดสถิต (static compression loads) ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย รูปที่ 5.27 แสดงความแข็งของเหล็กมังกานีส 13% เช่นเดียวกันในฟังก์ชันของเวลาการต้ด้วยค้อน ซึ่งในรูปที่ 5.27 นี้แสดงความแข็งที่เพิ่มขึ้นอย่างน่าแปลก เมื่อเทียบกับการให้ภาระกรรมสถิต ในรูปที่ 5.26 ส่วนรูปที่ 5.28 แสดงความแข็งกระจายตัวอยู่บนภาคตัดขวางของเหล็กมังกานีส 13% ที่คลุมอยู่บนตัวหมุนบดที่แข็งตัวจากการใช้งานแล้ว รูปที่ 5.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการชุบของบั้งกี้และการขัดถูของฟันบั้งกี้

โลหะรอยเชื่อมชนิดมังกานีส-ออสเตนไนติกนี้ไม่ได้แสดงผลที่น่าชมเชยนักในรูปที่ 5.20 เพราะว่าการทำงานในการชุบนั้นเป็นรายละเอียดที่เปี้ยก และไม่มีภาระกรรมและการแตกที่เกิดขึ้นจากการทดสอบนี้เป็นที่น่าสังเกตว่าวัสดุชนิดนี้จะไม่ให้ผลตามที่ต้องการ นอกจากจำเป็นต้องใช้งานที่มีคุณลักษณะความสามารถในการอ่อนตัวสูงและแข็งตัวเมื่อทำงาน

รูปที่ 5.30 แสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอของรอยเชื่อมพอกผิวแข็งที่ปลายของริปเปอร์ (ripper) ที่ใช้ชุดดิน เนื่องจากที่ปลายของริปเปอร์ได้รับภาระกรรมและการแตกที่หนัก ดังนั้นโลหะรอยเชื่อมมังกานีส-ออสเตนไนติกจึงแสดงผลที่ดีมากกว่าโลหะรอยเชื่อมชนิดทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ โลหะรอยเชื่อมชนิดมังกานีส-ออสเตนไนติกให้ผลทางด้านการสึกหรอมากกว่าในช่วงแรก ๆ แต่จะมีการสึกหรอน้อยลงในเวลาต่อมา เนื่องมาจากการแข็งตัวเมื่อทำงาน ส่วนโลหะรอยเชื่อมชนิดทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ให้ผลทางด้านการเพิ่มความสึกหรอในทันทีเนื่องจากการแตกของโลหะ

เนื่องจากเหล็ก 13% มังกานีสมีคุณลักษณะที่เป็นพิเศษ เราจึงควรใส่ใจเป็นพิเศษในการเชื่อม ดังอธิบายต่อไปนี้

a) เนื่องจากเหล็ก 13% มังกานีส จะตกตะกอนคาร์ไบด์ และเกิดความเปราะโดยการได้รับความร้อน ดังนั้นชั้นเชื่อมทุก ๆ ชั้นควรจะถูกทำให้เย็นลงด้วยน้ำหรืออากาศเพื่อป้องกันการแตกร้าว

b) ทำการเชื่อมได้ชั้นเชื่อมด้วยอิเล็กโทรดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนไนติกหรืออิเล็กโทรดคาร์บอนต่ำ, 16% มังกานีส – 16% โครเมียม เมื่อทำการเชื่อมพอกผิวแข็งโลหะรอยเชื่อมเหล็ก 13% มังกานีส บนเหล็กอะลูมิเนียมหรือเหล็กคาร์บอนต่ำ



c) การเชื่อมพอกผิวแข็งรอยเชื่อม 13% มังกานีส ลงบนเหล็ก 13% มังกานีส ไม่จำเป็นต้องทำการเชื่อมได้ชั้นเชื่อม อย่างไรก็ตามผิวหน้าที่แข็งตัวจากการทำงานของเหล็ก 13% มังกานีส ควรจะเจียรระไนออกให้หมดก่อนที่จะทำการเชื่อม

d) ปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ a) เมื่อทำการเชื่อมพอกรอยเชื่อมชนิดมาร์เทนไซต์ิก ลงบนโลหะรอยเชื่อม 13% มังกานีส

### 5.5.5 ชนิดมังกานีส-โครเมียม ออสเตนไนติก

(Manganese-chromium austenitic type)

อิเล็กโทรดชนิดคาร์บอนต่ำ 16% Mn-16%Cr และชนิดคาร์บอนสูง 16%Mn-16%Cr เป็นอิเล็กโทรดชนิดมังกานีส-โครเมียม ออสเตนไนติก อิเล็กโทรดชนิดคาร์บอนสูง 16%Mn-16%Cr มีโครงสร้างออสเตนไนติกที่เสถียรมากกว่าเหล็ก 13%Mn โดยคล้าย ๆ กับเหล็กกล้าไร้สนิม 18%Cr-8%Ni แต่จะมีข้อดีน้อยกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม 18%Cr-8%Ni ในด้านความสามารถในการคงตัวของโครงสร้างออสเตนไนติก เพราะว่ามันมีโมลิบดีนัมและวานาเดียมที่ช่วยต้านทานการสึกหรอ โลหะชนิดนี้ถูกใช้เป็นตัวสำหรับด้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงมากกว่าที่อุณหภูมิห้อง และโลหะชนิดนี้ความเป็นไปได้ในการที่จะเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ิกในการพอกผิวหน้าของโลหะเหล็กอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าเจือดำ

รูปที่ 5.31 แสดงความแข็งที่กระจายตัวตามภาคตัดขวางของโลหะรอยเชื่อมคาร์บอนสูง 16%Mn-16%Cr ที่เชื่อมพอกบนเหล็กอะลูมิเนียม ในการเชื่อมพอกผิวหน้าด้วยโลหะเชื่อมชนิดนี้จำเป็นต้องทำการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมหรือเชื่อมได้ชั้นเชื่อมด้วยอิเล็กโทรดคาร์บอนต่ำ 16%Mn-16%Cr หรืออิเล็กโทรดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนไนติกเพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าวเนื่องจากมันมีความสามารถในการอ่อนตัวที่ต่ำกว่าชนิดออสเตนไนติกอื่น ๆ โลหะชนิดนี้ยังมีสมบัติที่แข็งตัวได้เมื่อได้รับการทำงานและด้านทานการขัดถูด้วยแรงกระแทกที่รุนแรงได้อย่างดีเยี่ยม

เนื่องจากโลหะชนิดนี้แสดงสมบัติที่ดีที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีประโยชน์สำหรับการตัดเนื้อร้อน (hot shear) และการเลื่อยร้อน (hot saw) ซึ่งถูกใช้งานในที่อุณหภูมิสูงรูปที่ 5.32 แสดงผลของการทดสอบการตัดเนื้อร้อนของโลหะรอยเชื่อมผิวหน้าหลาย ๆ ชนิดบนเหล็กกล้า SF-60 (C=0.5%)

### 5.5.6 ชนิดโครเมียมสูง (High-chromium)

ส่วนผสมทางเคมีโดยทั่วไปของอิเล็กโทรดชนิดโครเมียมสูงคือ 4%C-25%Cr โลหะ

รอยเชื่อมชนิดนี้จะมี khả năngต้านทานการกัดกร่อนความเค้นต่ำได้ดีมาก ธาตุเจือนี้มีโครงสร้างอสเตนไนติกที่เสถียรซึ่งทำให้โครเมียมคาร์ไบด์ที่ตกตะกอนกระจายตัวได้มาก เนื่องจากโครเมียมคาร์ไบด์จะให้ความต้านทานการสึกหรอแบบเกาะ, การกัดกร่อนแบบกัดและแบบครูดได้อย่างดี ดังนั้นจึงถูกใช้อย่างกว้างขวางสำหรับเครื่องตัดของเครื่องจักรกลการก่อสร้างและฝาครอบเครื่องดูดทราย

รูปที่ 5.33 แสดงความแข็งแรงที่เสถียรในช่วงของอุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมรูปที่ 5.34 แสดงความแข็งแรงที่อบอุ่นตัวแล้วของโลหะรอยเชื่อมโครเมียมสูง ความแข็งแรงของโลหะรอยเชื่อมนี้จะรักษาความเสถียรไว้จนถึงอุณหภูมิ 600 °ซ.

อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อม 300 °ซ. มีความจำเป็นสำหรับการเชื่อมรอยเชื่อมโครเมียมสูง และอุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อม 150 °ซ. มีความจำเป็นสำหรับการเชื่อมได้ชั้นเชื่อมด้วยอิเล็กโทรดไฮโดรเจนต่ำ หรืออิเล็กโทรดเหล็กกล้าไร้สนิมอสเตนไนติกเพื่อป้องกันการแตกร้าว

ในการจัดรูปแบบตัดภายใต้ความเค้นสูง โลหะรอยเชื่อมโครเมียมสูงแสดงความต้านทานได้เทียบเท่ากับโลหะรอยเชื่อมทั้งสแตนคาร์ไบด์ แต่ในการจัดรูปแบบครูดด้วยความเค้นต่ำโลหะรอยเชื่อมโครเมียมสูงจะต้านทานได้ดีกว่าโลหะรอยเชื่อมแบบแบบทั้งสแตนคาร์ไบด์

รูปที่ 5.35 แสดงผลการปฏิบัติของปริมาณการกัดกร่อนแบบกัดด้วยหินแกรนิต ส่วนตารางที่ 5.6 เป็นรายละเอียดของการสึกหรอจริง ๆ ของฝาครอบเครื่องดูดทรายที่เชื่อมพอกผิวแข็งด้วยอิเล็กโทรดต่าง ๆ

#### 5.5.7 ชนิดทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Tungsten-carbide type)

เป็นที่รู้กันดีว่า โลหะที่มีแกรนคาร์ไบด์แข็งอยู่ในพื้นผิวที่อ่อนจะมีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงมาก โลหะที่มีธาตุเจือโครเมียมสูง และธาตุเจือโครเมียมคาร์ไบด์เป็นโลหะโดยทั่วไปซึ่งมีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงมาก อิเล็กโทรดทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เป็นสินค้าของบริษัทโกเบสตีลจะมีอยู่สองชนิด ชนิดแรกเป็นอิเล็กโทรดชนิดที่อกกลางซึ่งบรรจุด้วยฟลักซ์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ และอีกชนิดหนึ่งเป็นอิเล็กโทรดตันซึ่งมีทั้งสแตนคาร์ไบด์อยู่ในสารพอกหุ้ม

รูปที่ 5.36 แสดงความแข็งแรงที่กระจายตัวของภาคตัดขวางโลหะรอยเชื่อม การแปรเปลี่ยนของความแข็งแรงก็เนื่องจากโครงสร้างคาร์ไบด์ที่ไม่สม่ำเสมอในพื้นผิวที่อ่อน

รูปที่ 5.37 แสดงความแข็งแรงของคาร์ไบด์ในโลหะรอยเชื่อม

โลหะรอยเชื่อมทั้งสแตนคาร์ไบด์ใช้อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมสูงถึง 300 °ซ. เพื่อป้องกันการแตกร้าว การเชื่อมหลายชั้นเชื่อมในกรณีนี้ควรจะหลีกเลี่ยงสำหรับป้องกันการแตกร้าว

โลหะรอยเชื่อมชนิดทั้งสแตนคาร์ไบด์มีความต้านทานการสึกหรอที่ยอดเยี่ยมมาก ในด้านการจัดรูปแบบครูด และแบบบด โดยไม่มีแรงกระแทก

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการทดสอบของผิวหน้าชนิดทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ต้านทานการกัดต่อมิตต์ของเครื่องคราด (drogger) โดยเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมชนิดอื่น ๆ

#### 5.5.8 ชนิดอื่น ๆ (other types)

วัสดุงานเชื่อมสิ้นเปลืองต่อไปนี้ใช้สำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง อย่างไรก็ตามมันก็ไม่ได้ถูกใช้สำหรับเครื่องตักใช้กำลัง (power shovels) , รถปราบดิน (bulldozers) และเครื่องจักรกลการก่อสร้างอื่น ๆ

- a. อิเล็กโทรดธาตุเจือโคบอลต์
- b. ลวดเชื่อมโลหะ
- c. แท่งลวดเชื่อมก๊าซ

### 5.6 การเชื่อมซ่อมแซมเครื่องตักใช้กำลัง

#### (Repair welding of power shovels)

เครื่องตักใช้กำลังใช้งานได้ดีเช่นเดียวกับรถปราบดิน (bulldozer) สำหรับใช้งานในการก่อสร้าง เครื่องตักใช้กำลังถูกใช้สำหรับการขุดและบรรทุกหินกับทราย โดยสามารถที่จะแยกออกได้เป็นสองชนิดคือ แบบบรรทุกและแบบขุด โดยพิจารณาจากการนำไปใช้งานของมันการทำงาน of เครื่องตักชนิดใช้ขุดมีเงื่อนไขในการทำงานแตกต่างกันมากจากเครื่องตักชนิดบรรทุกดังนั้นเครื่องตักชนิดใช้ขุดจึงมีการสึกหรอและต้องเชื่อมซ่อมแซมบ่อยมาก

เครื่องตักใช้กำลังประกอบด้วยส่วนขั้วล่าง, ส่วนหมุนตัวบน, และส่วนประกอบอื่นรวมทั้งดิพเปอร์ และตัวบุงก์ เนื่องจากส่วนขั้วล่างของเครื่องตักใช้กำลังจะคล้ายกันมากกับส่วนขั้วล่างของรถปราบดิน ดังนั้นจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 6 สำหรับการเชื่อมซ่อมแซมส่วนอื่น ๆ จะเป็นส่วนหลักของเครื่องตักใช้กำลังนี้ ในบทเรียนต่อไปนี้จะกล่าวถึงการเชื่อมซ่อมแซมดิพเปอร์ (dipper)

การสึกหรอของดิพเปอร์จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของจุดมุ่งหมายในการตัก และรูปแบบของการสึกหรอจะแปรเปลี่ยนจากการจัดแบบครูดจนถึงการจัดแบบเขาะ วิธีดำเนินการเชื่อมสำหรับการซ่อมแซมขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้กับจุดมุ่งหมายในการตัก ตารางที่ 5.8 แสดงรายการวัสดุโดยทั่วไปที่ใช้ทำดิพเปอร์ ดิพเปอร์ประกอบด้วยหน้าดิพเปอร์, เปลือกดิพเปอร์, ฟันดิพเปอร์ประตูดิพเปอร์ และสลักดิพเปอร์ ฟันดิพเปอร์และหน้าดิพเปอร์มักจะเป็นส่วนที่เกิดการสึกหรอมากที่สุด แท่งสลัก

และตัวเก็บสลักของประตูดิพเปอร์ก็จะได้รับการจัดดูเช่นเดียวกันเมื่อดิพเปอร์ชุดและดักทรายหรือหิน

#### 5.6.1 หน้าดิพเปอร์ (Dipper fronts)

ชิ้นส่วนด้านหน้าของดิพเปอร์ถูกเรียกว่าหน้าดิพเปอร์ และพื้นดิพเปอร์จะถูกยึดติดอยู่บนหน้าดิพเปอร์ด้วยสลักล็อก ที่ขอบของหน้าดิพเปอร์จะมีการสึกหรออย่างรวดเร็วและง่ายดาย โดยปกติแล้วหน้าดิพเปอร์นี้จะทำด้วยเหล็กเหนียวหล่อมังกานีสสูงอสเตนไนติก โครงสร้างอสเตนไนติกจะอ่อนและป้องกันการสึกหรอได้อย่างดีเยี่ยม

วิธีดำเนินการเชื่อมสำหรับการซ่อมแซมดิพเปอร์หน้าได้สรุปรวบรวมไว้ในตารางที่ 5.10

ในกรณีของการสึกหรออย่างรุนแรง ควรทำการเชื่อมได้ชั้นเชื่อมด้วยอิเล็กโทรดอสเตนไนติก และเชื่อมชั้นคลุมด้วยอิเล็กโทรดสำหรับพอกผิวแข็ง เทคนิคการเชื่อมแบบเป็นเส้น (Stringer) หรือเทคนิคการเชื่อมแบบเป็นตาราง (lattice) จะถูกนำมาใช้สำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็งของหน้าดิพเปอร์ ดิพเปอร์ประกอบด้วยหน้าดิพเปอร์, แผ่นผนัง (wall plate), และเปลือกดิพเปอร์ แผ่นผนังของดิพเปอร์มักจะทำด้วยเหล็กละมุนหรือเหล็กเจือดำ, เหล็กกล้าแรงดึงสูง เพื่อจะซ่อมแซมต่อระหว่างหน้าดิพเปอร์และแผ่นผนัง อิเล็กโทรดชนิดอสเตนไนติก เช่น NC-39 และ MC-16 ก็จะถูกนำมาใช้ การดูแลอย่างพิเศษสำหรับการเชื่อมหน้าดิพเปอร์มังกานีสสูง ควรจะกระทำเพื่อจะป้องกันการแตกร้าว

#### 5.6.2 พื้นดิพเปอร์ (Dipper teeth)

วัสดุที่ใช้ทำพื้นดิพเปอร์คือเหล็กกล้ามังกานีสสูงหรือเหล็กกล้าเจือดำ วิธีดำเนินการเชื่อมสำหรับการซ่อมแซมจะขึ้นอยู่กับวัสดุนั้น ๆ

วิธีการหนึ่งที่จะรู้ว่าเป็นเหล็กกล้ามังกานีสสูงหรือไม่ นั่น ก็โดยการใช้แม่เหล็ก โดยที่เหล็กกล้ามังกานีสสูงจะไม่มีสมบัติเป็นแม่เหล็ก

##### 1. การซ่อมแซมการสึกหรอที่ไม่รุนแรงของเหล็กกล้ามังกานีสสูง

(Repair for light wear of high – manganese steel)

หลังจากเจียรระดับชั้นที่แข็งตัวจากการทำงานออกไปแล้ว ก็ควรทำการเชื่อมได้ชั้นเชื่อมด้วยอิเล็กโทรดชนิดมังกานีส-โครเมียมอสเตนไนติก หรืออิเล็กโทรดชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมอสเตนไนติก และเชื่อมพอกขึ้นมาด้วยอิเล็กโทรดสำหรับพอกผิวแข็งจนได้ขนาดที่ต้องการอิเล็กโทรดสำหรับพอกผิวแข็งที่ถูกต้องควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับเงื่อนไขในการชุดักตามตารางที่

5.10 การจัดดูโดยกรวดหรือก้อนหินอาจจะรวมถึงการจัดดูแบบตัด, แบบบด, แบบเซาะ และแบบ

กระแทก ดังนั้นโลหะรอยเชื่อมจึงควรที่จะมีความเหนียวเพียงพอสำหรับการขัดถูเหล่านี้ สำหรับการตักดินส่วนใหญ่จะเป็นการขัดถูแบบครูด ดังนั้นโลหะรอยเชื่อมที่แข็งจะมีความต้านทานที่ดีมาก รูปที่ 5.38 แสดงเทคนิคการพอกผิวแข็งหลาย ๆ แบบคือรอยเชื่อมแบบตาราง (lattice weld), รอยเชื่อมแบบเส้น (stringer weld), รอยเชื่อมที่ขอบ (edge weld) และรอยเชื่อมแบบคลุมทั้งหมด (overall weld)

## 2. การเชื่อมซ่อมแซม การสึกหรออย่างมากของเหล็กกล้ามังกานีสสูง

(Repair of heavy wear of high-manganese steel)

ในกรณีของการสึกหรออย่างมาก วิธีดำเนินการเชื่อมที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 1 อาจจะต้องใช้อิเล็กโตรดเป็นปริมาณที่มากขึ้น, จำนวนชั่วโมงในการเชื่อมมากขึ้น และชั้นเมื่อหลายชั้นเชื่อมที่มากเกินไป ซึ่งสามารถเป็นสาเหตุของการบิดตัวและการแตกร้าว ดังนั้นวิธีการเชื่อมต่อไปนี้อาจได้ถูกแนะนำให้ใช้ วิธีการหนึ่งก็คือการติดตั้งแท่งเหล็กกล้าตรงส่วนช่องว่างที่สึกหรอไปดังรูปที่ 5.39 วัสดุสำหรับเสริมนี้อาจจะเป็นเหล็กกล้ามังกานีสสูงหรือเหล็กกล้าเจือดำ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของการสึกหรอ ดังนั้นคือ เหล็กกล้ามังกานีสสูงสำหรับการกระแทกที่รุนแรง และเหล็กกล้าเจือดำสำหรับการกระแทกที่ไม่รุนแรง การเตรียมรอยต่อควรจะทำเป็นร่องเอียงเพื่อให้ทำการเชื่อมได้อย่างสมบูรณ์ และผิวหน้าของร่องเชื่อมควรทำการเชื่อมได้ชั้นเชื่อมด้วยอิเล็กโตรดออสเตนไนติก ส่วนการเชื่อมชั้นสุดท้ายควรใช้อิเล็กโตรดสำหรับพอกผิวแข็ง

สำหรับอีกวิธีการหนึ่งก็คือการติดตั้งเหล็กกลมุนที่ช่องว่างของการสึกหรอ แล้วทำการเชื่อมได้ชั้นเชื่อมบนผิวหน้าของฟันคิพเบอร์ที่ยังเหลืออยู่ด้วยอิเล็กโตรดออสเตนไนติก ต่อจากนั้นก็เชื่อมพอกช่องว่างจนได้รูปทรงเริ่มแรก สำหรับวิธีดำเนินการเชื่อมนั้นจะทำตามตารางที่ 5.10

## 3. การเชื่อมซ่อมแซมการสึกหรอที่ไม่รุนแรงของฟันที่เป็นโลหะเจือต่ำ

(Repair for light wear of low-alloy tooth)

ถ้าการสึกหรอน้อยกว่า 10 มม. ก็ทำการเชื่อม ซ่อมโดยตรงด้วยอิเล็กโตรดสำหรับพอกผิวแข็งดังที่แสดงในตารางที่ 5.11 แต่ถ้าการสึกหรอมากกว่า 10 มม. ก็ทำการเชื่อมได้ชั้นเชื่อมด้วยอิเล็กโตรดไฮโดรเจนต่ำก่อนที่จะทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมควรจะมีมากกว่า 250 °ซ. ตลอดแนวเชื่อมที่จะได้รอยเชื่อมที่สมบูรณ์ การเชื่อมพอกผิวครั้งสุดท้ายสามารถกระทำได้โดยการเชื่อมแบบตาราง หรือการเชื่อมที่ขอบด้วยอิเล็กโตรดชนิดโบรอน-มาร์เตไนติก, อิเล็กโตรดชนิดโครเมียมสูง, หรืออิเล็กโตรดชนิดทังสเตนคาร์ไบด์ โดยขึ้นอยู่กับลักษณะการขัดถูเป็นแบบใด

#### 4. การเชื่อมซ่อมแซมการสึกหรออย่างมากของฟันที่เป็นโลหะเจือต่ำ

(Repair for heavy wear of low-alloy tooth)

ทำการติดตั้งแท่งเหล็กกล้าที่ช่องว่างของการสึกหรอ ตามที่ได้กล่าวถึงไว้ในหัวข้อที่ 2 โดยที่เหล็กกล้าเจือต่ำจำเป็นต้องทำการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อม สำหรับอนุกรมการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมควรจะกำหนดตามชนิดของเหล็ก และสำหรับวิธีการดำเนินการเชื่อมจะทำตามตารางที่ 5.11

##### 5.6.3 แท่งสลักและตัวเก็บแท่งสลัก (Latch bars and tatch keepers)

แท่งสลักและตัวเก็บแท่งสลักจะสอดคล้องกับประตูดิฟเปอร์และบั้งกี (bucket) ทั้งแท่งสลักตัวเก็บแท่งสลักจะถูกการขัดถูอยู่เสมอระหว่างการทำงาน

วัสดุของแท่งสลักปกติจะเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางและเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ส่วนวัสดุของตัวเก็บแท่งสลักก็มักจะเป็นเหล็กมังกานีสสูงเนื่องจากมันจะได้รับการขัดถูแบบบดตามด้วยความเค้นกระแทก

อิเล็กโทรดสำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็งแท่งสลักและตัวเก็บแท่งสลักได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.12 และ 5.13 แต่สำหรับเครื่องตักใช้กำลังขนาดใหญ่ การเชื่อมพอกผิวแข็งควรจะทำด้วยอิเล็กโทรดชนิดโครเมียมสูง

##### 5.6.4 ล้อถูกรอก (Sheaves)

วัสดุที่ใช้ทำล้อถูกรอกคือเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางหรือเหล็กหล่อ สำหรับล้อถูกรอกเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ต้องอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมที่ 150°C. และเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยอิเล็กโทรด HF-350 หรือ HF -260 ในกรณีของการสึกหรออย่างมากก็ทำการเชื่อมได้ชั้นเชื่อมด้วยอิเล็กโทรด LB-26

สำหรับล้อถูกรอกเหล็กหล่อ ต้องอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมที่ 200°C. และเชื่อมได้ชั้นเชื่อมด้วยอิเล็กโทรดชนิดนิเกิล แล้วทำการเชื่อมปกคลุมด้วยอิเล็กโทรดสำหรับเชื่อมพอกผิวแข็ง

#### 5.7 การเชื่อมซ่อมแซมรถปรอบดิน

(Repair welding of bulldozers)

สำหรับการเชื่อมซ่อมแซมใบมีดและปลายเหล็กจัด (repper-tip) ของรถปรอบดินจะอ้างถึงหัวข้อที่ 7.1 และ 7.2 เนื่องจากวัสดุเหล็กกล้าและการขัดถูต่าง ๆ จะคล้ายกันกับชิ้นส่วนนั้น ๆ ของดิฟเปอร์

### 5.7.1 ลูกกลิ้ง (Rollers)

ลูกกลิ้งมีอยู่สองชนิดคือ ลูกกลิ้งตัวล่าง และลูกกลิ้งตัวบน ชนิดของการสึกหรอก็จะแตกต่างกันเล็กน้อยระหว่างทั้งสองชนิด และวิธีดำเนินการเชื่อมก็เกือบเหมือนกัน ตารางที่ 5.14 เป็นข้อสรุปวิธีดำเนินการเชื่อมสำหรับการซ่อมแซมลูกกลิ้งตัวล่าง ในตารางนี้อิเล็กโทรดสำหรับลูกกลิ้งตัวหน้าและลูกกลิ้งตัวหลัง กับลูกกลิ้งตัวกลางจะแตกต่างกัน เหตุผลที่ทำให้อิเล็กโทรดจึงแตกต่างกัน แสดงในรูปที่ 5.40 การสึกหรอของลูกกลิ้งแต่ละลูกนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งการติดตั้งและการกระทำที่ได้รับ

ในการเชื่อมลูกกลิ้งต่างๆ นี้จะใช้วิธีการแบบสมนัย (symmetrical sequence) ดังแสดงในรูปที่ 8.2 เพื่อให้เกิดการบิดตัวน้อยที่สุด

การเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติสามารถนำมาใช้ได้สำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็งลูกกลิ้งโดยใช้กำหนดตำแหน่งแบบหมุนรอบตัว เส้นลวดเชื่อมต้นและเส้นลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สามารถนำมาใช้

### 5.7.2 จานโซ่และตัวอิสระ (Sprockets and idlers)

จานโซ่ตัวขับและตัวอิสระ เป็นส่วนที่ถูกขัดด้วยข้อต่อ (track links) ชนิดของการสึกหรอคล้ายกับการสึกหรอของลูกกลิ้ง (track roller) ตารางที่ 5.15 เป็นข้อสรุปวิธีดำเนินการเชื่อมสำหรับการซ่อมแซมจานโซ่และตัวอิสระ รูปที่ 5.42 แสดงวิธีการเชื่อมสำหรับจานโซ่และตัวอิสระ โดยใช้วิธีการแบบสมนัยเพื่อลดการบิดตัวจากการเชื่อม

การเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติและแบบอัตโนมัติ สามารถใช้ได้กับการเชื่อมพอกผิวแข็งจานโซ่และตัวอิสระโดยวิธีการเช่นเดียวกับการเชื่อมลูกกลิ้ง

### 5.7.3 ข้อต่อ (Track links)

ตารางที่ 5.16 เป็นข้อสรุปถึงวิธีดำเนินการเชื่อมสำหรับการซ่อมแซมข้อต่อ การเชื่อมได้ชั้นเชื่อมควรจะนำมาใช้เมื่อจะทำการเชื่อมพอกผิวหนามากกว่า 5 มม. หรือเมื่อโลหะรอยเชื่อมพอกผิวแข็งของการซ่อมแซมครั้งสุดท้ายที่ผ่านมานั้นยังหลงเหลืออยู่ โลหะรอยเชื่อมของการซ่อมแซมครั้งสุดท้ายที่ตกค้างอยู่มักจะมีรอยแตกร้าว ดังนั้นจึงต้องเอารอยแตกร้าวออกให้หมดแล้วจึงเชื่อมด้วยความระมัดระวัง

การเชื่อมสามารถกระทำได้ด้วยตะเข็บเชื่อมแบบเส้นตรงหรือใช้การส่าย ดังรูปที่ 5.43 การเชื่อมแบบอัตโนมัติหรือแบบกึ่งอัตโนมัติสามารถใช้ได้ด้วยเส้นลวดเชื่อมต้นหรือเส้นลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

#### 5.7.4 ดินตะขาบ (Shoe)

ในกรณีของการสึกหรออย่างมาก ให้เอาส่วนที่อื่นออกมาจากแผ่นดินตะขาบออก แล้วก็ติดตั้งเหล็กละมุนใหม่ หรือเหล็กกล้าเจือดำแล้วทำการเชื่อม ดังที่แสดงในรูปที่ 5.44

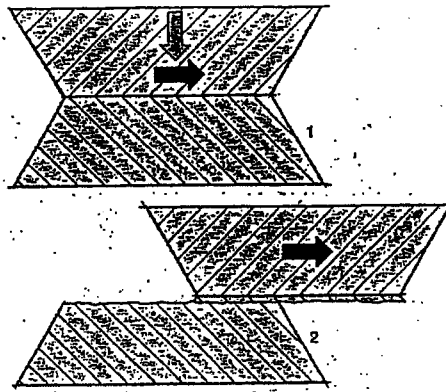
เมื่อวัสดุที่ใช้ทำดินตะขาบเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง การเชื่อมต่อก็สามารถกระทำได้ด้วยอิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำ เช่น LB-26 และเมื่อวัสดุที่ใช้ทำดินตะขาบเป็นเหล็กกล้ามังกานีสสูง อิเล็กโทรดออสเทนไนติก เช่น MC-16 และ NC-39 ก็ควรจะนำมาใช้สำหรับการเชื่อมต่อ

ในกรณีของการสึกหรอที่ไม่มากนัก ก็ทำการเชื่อมพอกผิวแข็งเฉพาะที่ปลายผิวหน้าของส่วนอื่นเท่านั้น อิเล็กโทรดชนิดโบรอนมาร์เทนไซติก (HF-800K), หรืออิเล็กโทรดชนิดมาร์เทนไซติก (HF-650) ก็สามารถนำมาใช้ได้กับการเชื่อมพอกผิวแข็งดินตะขาบ

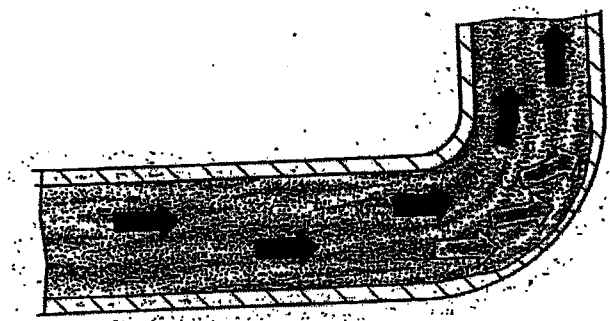


ตารางที่ 5.1 ชนิดของการสึกหรอของโลหะ

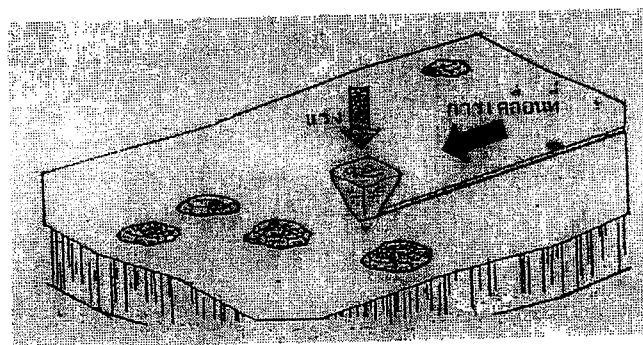
ชนิดของการสึกหรอ	ภาวะของการสึกหรอ
การสึกหรอแบบเกาะติด (Adhesive wear)	เมื่อโลหะมีการขัดถูซึ่งกันและกัน โลหะทั้งสองก็จะเกิดการเกาะติดกันที่บริเวณเล็ก ๆ ของผิวหน้าที่สัมผัสกันและต่อมาโลหะที่แข็งกว่า ตัวอย่าง : การสึกหรอระหว่างเพลากับตัวรองลื่น
การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear) a) การขัดถูแบบเซาะ (Erosion)	การสึกหรอที่มีสาเหตุมาจากของเหลว โดยที่ของเหลวนี้อาจจะมีของแข็งปนอยู่ เมื่อของเหลวทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวหน้าของแข็ง โลหะที่หลุดออกอาจจะเกิดโดยการกัดกร่อนเช่นเดียวกันโดยปฏิกิริยาทางกล ตัวอย่าง : การสึกหรอที่ด้านในของฝาครอบปั๊มอุตสาหกรรม
b) การสึกหรอแบบครูด (Scratching abrasion)	การสึกหรอของผิวหน้าโลหะโดยการครูดภายใต้ความเค้นปานกลาง และความเค้นต่ำ ๆ ส่วนใหญ่จะมีสาเหตุมาจากเกรนที่ไม่ใช่โลหะ ตัวอย่าง : การสึกหรอที่มีสาเหตุจากรายละเอียด
c) การสึกหรอแบบบด (Grinding abrasion)	การสึกหรอที่ถูกสกัดออกบนผิวหน้าโลหะภายใต้แรงอัดสูงที่ซ้ำ ๆ กัน โดยส่วนใหญ่จะเป็นความเค้นเฉือนโดยหินที่แหลมคม ตัวอย่าง : การสึกหรอของเครื่องบดแร่
d) การสึกหรอแบบสกัด (Gauging abrasion)	การสึกหรอที่ถูกสกัดออกบนผิวหน้าโลหะภายใต้แรงอัดสูงที่ซ้ำ ๆ กัน โดยส่วนใหญ่จะเป็นความเค้นเฉือนโดยหินที่แหลมคม ตัวอย่าง : ฟันคิพเปอร์, ส่วนที่หมุนของเครื่องบดแร่ค้อนในเครื่องบด
การสึกหรอแบบกระแทก (Impact Wear)	การกระแทกซ้ำ ๆ กันของผิวหน้าของแข็งเป็นสาเหตุของการสึกหรอแบบกระแทก ในที่สุดความเสียหายก็สามารถเป็นผลให้เกิดหลุมขึ้น ซึ่งวัสดุความเสียหายก็สามารถเป็นผลให้เกิดหลุมขึ้น ซึ่งวัสดุหรือเคลื่อนย้ายออกโดยกระบวนการการล้าตัว ที่ทำให้เกิดบ่อหรือหลุมที่ผิวหน้า ตัวอย่าง : หัวค้อน, ผิวหน้าของทั่ง



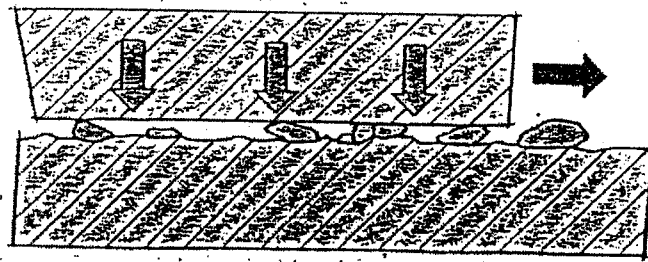
รูปที่ 5.1 แบบลักษณะของการสีกหรือแบบเกาะติด



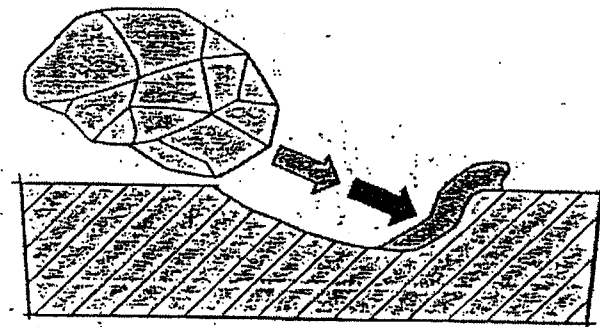
รูปที่ 5.2 แบบลักษณะของการขัฒแบบเขาวงกต



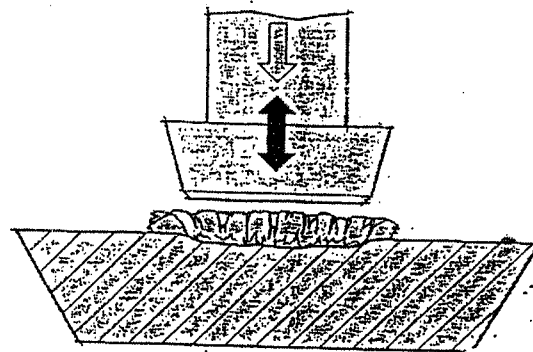
รูปที่ 5.3 แบบลักษณะของการสีกหรือแบบครูด



รูปที่ 5.4 แบบลักษณะของการสึกหรอแบบบด



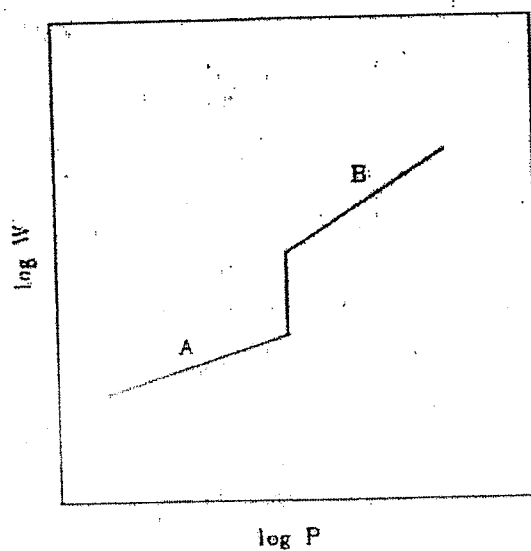
รูปที่ 5.5 แบบลักษณะของการสึกหรอแบบสกัด



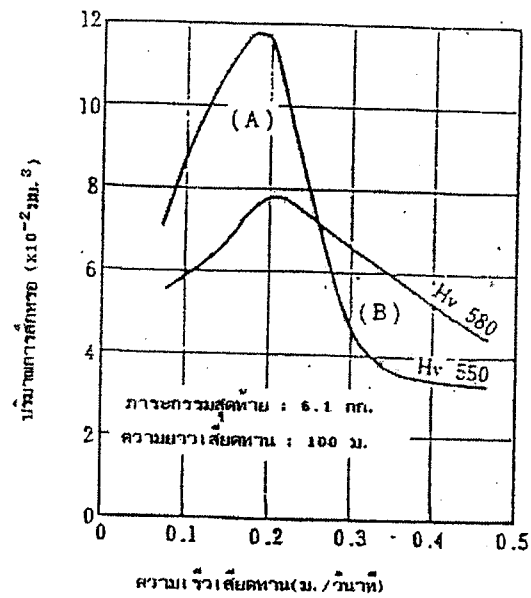
รูปที่ 5.6 แบบลักษณะของการสึกหรอแบบกระแทก

ตารางที่ 5.2 อุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ

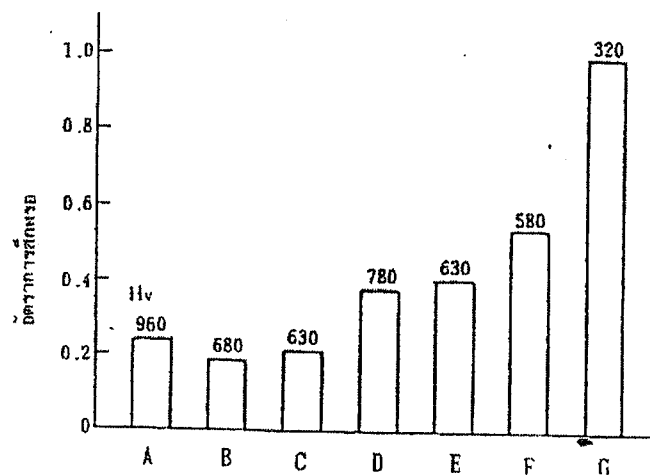
ชนิดของเหล็ก		อุณหภูมิให้ ความร้อนก่อนเชื่อม	ชนิดของเหล็ก		อุณหภูมิให้ ความร้อนก่อนเชื่อม
เหล็กคาร์บอน สำหรับงานโครงสร้าง	S45C	100-200 °C	เหล็กโครเมียม	SCr4	250-350°C
	S50C	150-250		SCr21	150-250
	S55C	250-350			
เหล็กเหนียวหล่อ	0.40-0.50%C	150-250	เหล็ก Cr-Mo	SCM4	250-350
	0.50-0.60%C	250-350		SCM21	150-250
เหล็กมังกานีสต่ำ	SAE1027	100-200	เหล็ก Ni-Cr	SAE3140	250-350
	SAE1036	200-300		SAE3150	300-450
	SAE1041	250-350	เหล็ก Ni-Cr-Mo	SNCM6	300-450
	SAE1330	200-300		SNCM7	300-450
	SAE1340	250-350			



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระกรรมและอัตราการใช้หล่อ  
(P = ภาระกรรม , W = อัตราการใช้หล่อ)



รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบสีหรือโลหะกับโลหะ



รูปที่ 5.9 ความต้านทานการกัดกร่อนของการเชื่อมพอกผิวแข็ง

A = ชนิดทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ (HF-950)

B : ชนิดโครเมียมสูง (HF-14)

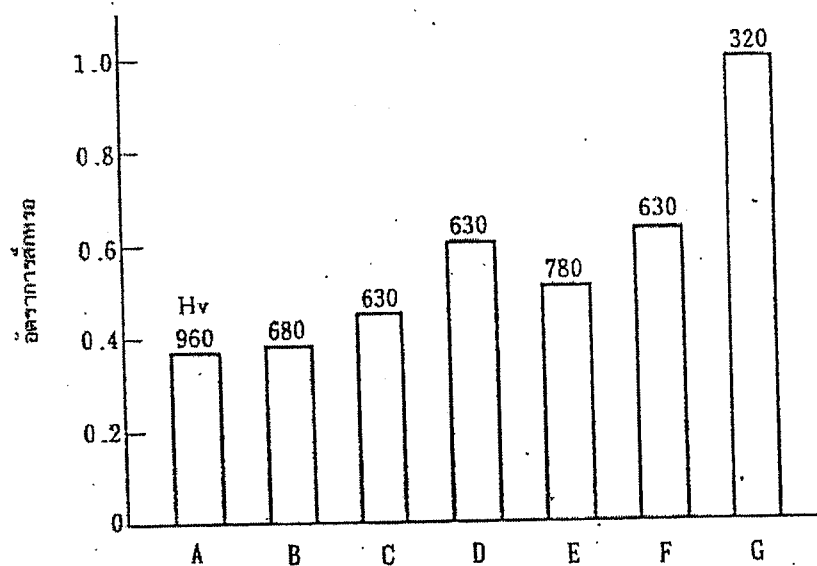
C : ชนิดโครเมียมสูง (4.5%C-4%Mn-25%Cr)

D : ชนิดโบรอนมาร์เทนไซต์ (HF-800K)

E : ชนิดมาร์เทนไซต์ (HF-650)

F : ชนิดมาร์เทนไซต์ (HF-12)

G : ชนิดเฟอไรต์ (HF-350)



รูปที่ 5.10 ความต้านทานการสึกหรอแบบบดของการเชื่อมพอกผิวแข็ง

A : ชนิดทั้งสแตนคาร์ไบด์ (HF-950)

B : ชนิดโครเมียมสูง (HF-14)

C : ชนิดโครเมียมสูง (4.5%C-4%Mn-25%Cr)

D : ชนิดโครเมียม 13%

E : ชนิดโบรอนมาร์เทนไซต์ (HF-800K)

F : ชนิดมาร์เทนไซต์ (HF-650)

G : ชนิดเพอร์ไลติก (HF-350)

ตารางที่ 5.3 อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง (JIS Z 3252-81)

ประเภท	ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเติม											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	Fe	Co	อื่นๆ
DF2A	0.30 max.	1.5 max.	3.0 max.	0.03 max.	0.03 max.	-	3.0 max.	1.5 max.	-	bal	-	1.0 max.
DF2B	0.30 -1.00	1.5 max.	3.0 max.	0.03 max.	0.03 max.	-	5.0 max.	1.5 max.	-	bal	-	1.0 max.
DF3B	0.20 -0.50	3.0 max.	3.0 max.	0.03 max.	0.03 max.	-	3.0 -9.0	2.5 max.	2.0 max.	bal	-	1.0 max.
DF3C	0.50 -1.50	3.0 max.	3.0 max.	0.03 max.	0.03 max.	-	3.0 -9.0	2.5 max.	4.0 max.	bal	-	2.5 max.
DF4A	0.30 max.	3.0 max.	4.0 max.	0.03 max.	0.03 max.	6.0 max.	9.0 -14.0	2.0 max.	2.0 max.	bal	-	2.5 max.
DF4B	0.30 -1.50	3.0 max.	4.0 max.	0.03 max.	0.03 max.	3.0 max.	9.0 -14.0	2.0 max.	2.0 max.	bal	-	2.5 max.
DF5A	0.50 -1.00	1.0 max.	1.0 max.	0.03 max.	0.03 max.	-	3.0 -5.0	4.0 -9.5	1.0 -7.0	bal	-	4.0 max.
DF5B	0.50 -1.00	1.0 max.	1.0 max.	0.03 max.	0.03 max.	-	3.0 -5.0	-	16.0 -19.0	bal	4.0 -11.0	4.0 max.
DFMA	1.10 max.	0.8 max.	11.0 -18.0	0.03 max.	0.03 max.	3.0 max.	4.0 max.	2.5 max.	-	bal	-	1.0 max.
DFMB	1.10 max.	0.8 max.	11.0 -18.0	0.03 max.	0.03 max.	3.0 -6.0	0.5 max.	-	-	bal	-	1.0 max.
DFME	1.10 max.	0.8 max.	12.0 -18.0	0.03 max.	0.02 max.	6.0 max.	14.0 -18.0	4.0 max.	-	bal	-	4.0 max.
DFCrA	2.5 -6.0	3.5 max.	7.5 max.	0.03 max.	0.03 max.	3.0 max.	20.0 -35.0	6.0 max.	6.5 max.	bal	5.0 max.	9.0 max.
DFWA	2.0 -4.0	2.5 max.	3.0 max.	0.03 max.	0.03 max.	3.0 max.	3.0 max.	7.0 max.	40.0 -70.0	bal	3.0 max.	2.0 max.
DCoCrA	0.70 -1.40	2.0 max.	2.0 max.	0.03 max.	0.03 max.	3.0 max.	25.0 -32.0	1.0 max.	3.0 -6.0	5.0 max.	bal	0.5 max.
DCoCrB	1.00 -1.70	2.0 max.	2.0 max.	0.03 max.	0.03 max.	3.0 max.	25.0 -32.0	1.0 max.	7.0 -9.5	5.0 max.	bal	0.5 max.
DCoCrC	1.75 -3.00	2.0 max.	2.0 max.	0.03 max.	0.03 max.	3.0 max.	25.0 -33.0	1.0 max.	11.0 -14.0	5.0 max.	bal	0.5 max.
DCoCrD	0.35 max.	1.0 max.	1.0 max.	0.03 max.	0.03 max.	3.5 max.	23.0 -30.0	3.0 -7.0	1.0 max.	5.0 max.	bal	0.5 max.

(max. = สูงสุด, bal. = ส่วนที่เหลือ)

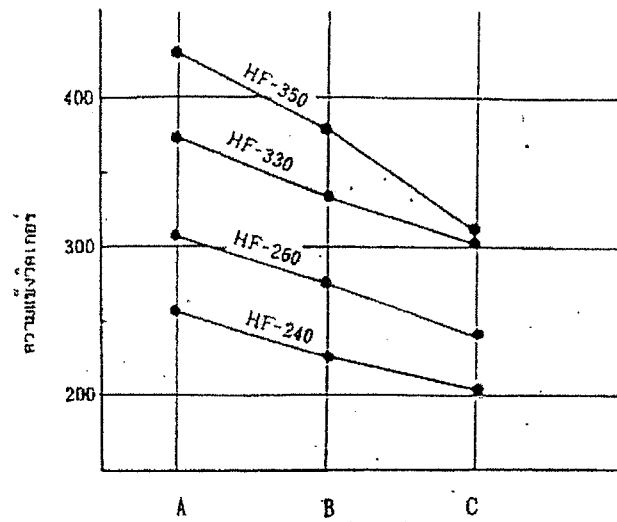
ตารางที่ 5.3 (ต่อ) การแบ่งประเภทของความแข็ง

ความแข็งปกติ	200	250	300	350	400	450	500	600	700
ช่วงความแข็ง	250	200	250	300	350	400	450	550	650
วิกเกอร์	สูงสุด	-300	-350	-400	-450	-500	-600	-700	ต่ำสุด

ตารางที่ 5.4 อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์โกเบสชนิดต่างๆ สำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง

ชนิดของโลหะรอยเชื่อม	ชื่อการค้า	ประเภทของ JIS	ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเติม(%)							
			C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	อื่นๆ
เหล็กกล้า	HF-240	DF2A-250-R	0.09	0.58	0.58	-	0.81	-	-	-
	HF-260	DF2A-300-B	0.17	6.69	1.91	-	-	-	-	-
	HF-330	DF2A-350-R	0.09	0.69	0.86	-	2.29	-	-	-
	HF-350	DF2A-400-B	0.25	0.49	1.38	-	1.16	-	-	-
มาร์เทนไซต์	HF-450	DF2A-450-B	0.20	1.21	0.39	-	2.54	0.57	-	V: 0.30
	HF-500	DF2B-500-B	0.32	1.37	1.15	-	-	0.98	-	V: 0.28
	HF-600	DF2B-600-B	0.48	0.88	2.58	-	2.50	-	-	-
	HF-650	DF3C-600-B	0.67	0.90	0.87	-	5.23	1.17	1.42	V: 0.55
	HF-700	DF3C-600-B	0.62	0.80	0.78	-	5.12	2.21	-	-
	HF-13	DF4A-450-B	0.13	0.42	0.69	0.99	12.97	0.97	-	-
ไบรอน-มาร์เทนไซต์	HF-800K	DF3C-700-B	0.80	1.65	1.24	-	3.82	-	2.42	B: 0.28
มังกานีสออกไซด์	HF-11	DFMA-250-B	0.82	0.39	13.88	-	-	-	-	-
เซมิ-ออกไซด์	HF-12	DF3C-500-B	0.61	0.89	1.26	-	7.30	1.12	-	-
มังกานีสโครเมียมออกไซด์	HF-16	DFME-300-B	0.83	0.62	15.62	2.20	15.33	1.84	-	V: 0.42
	MC-16	-	0.14	0.63	16.89	2.21	15.30	-	-	N: 0.12
โครเมียมสูง	HF-14	DFCrA-700-B	3.98	1.88	1.41	-	29.16	-	-	Co: 2.88
	HF-30	DFCrA-700-B	5.00	0.42	1.23	-	32.5	-	-	-
ทังสเตนคาร์ไบด์	HF-950	-	3.5	0.3	1.8	-	-	-	44	-
	HF-1000	-	2.8	0.5	1.7	-	-	-	56	-



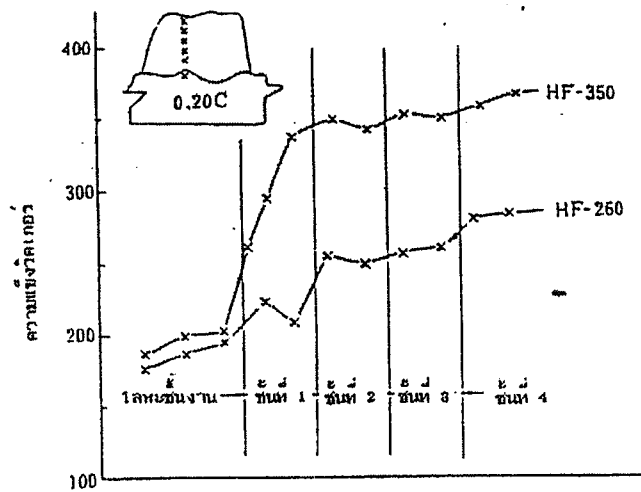


รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลี่ยนที่เชื่อมและความแข็งแรงของรอยเชื่อมชนิดเฟลิร์ไลติก

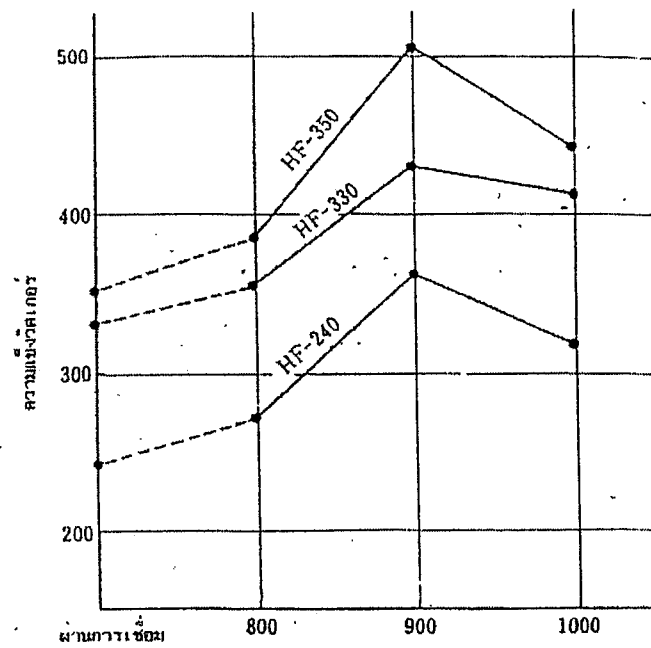
A : เย็นลงด้วยน้ำ

B : อุณหภูมิให้ความร้อนก่อนเชื่อมและเปลี่ยนที่เชื่อมที่ 150°C.

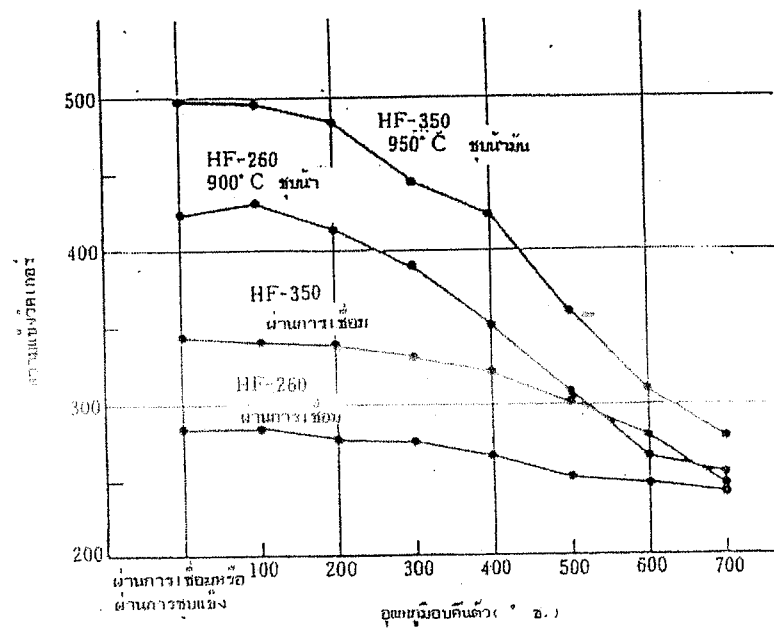
C : การเชื่อมต่อเนื่อง



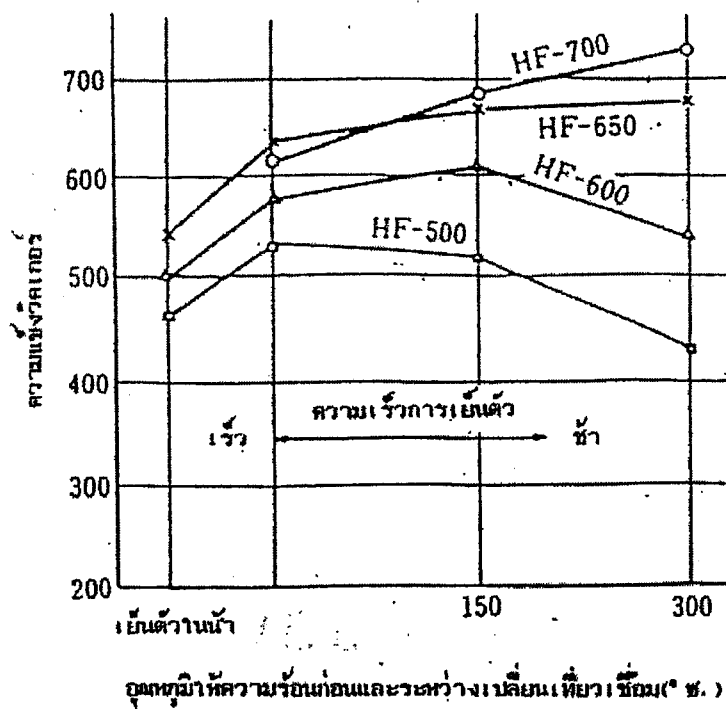
รูปที่ 5.12 การกระจายความแข็งแรงของรอยเชื่อมชนิดเฟลิร์ไลติก



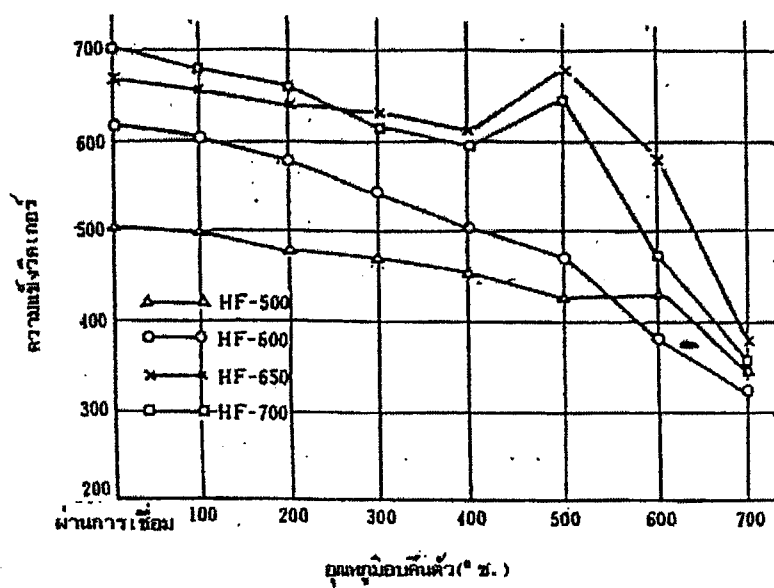
รูปที่ 5.13 ความแข็งแรงของรอยเชื่อมชนิดเฟลิร์ไลทิกเมื่ออุณหภูมิมิเป็นการชุบน้ำ



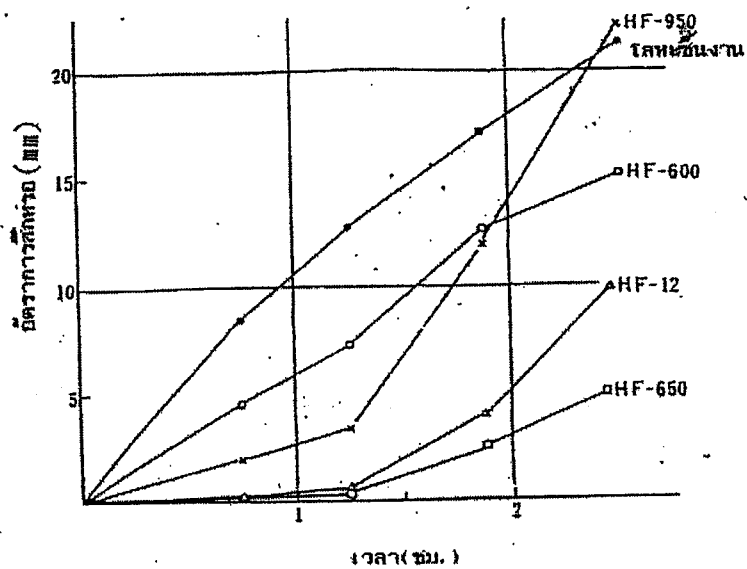
รูปที่ 5.14 ความแข็งแรงของรอยเชื่อมเฟลิร์ไลทิกเมื่อใช้ขึ้นคอนการชุบ และการอบคืนตัวหลายๆ อย่าง



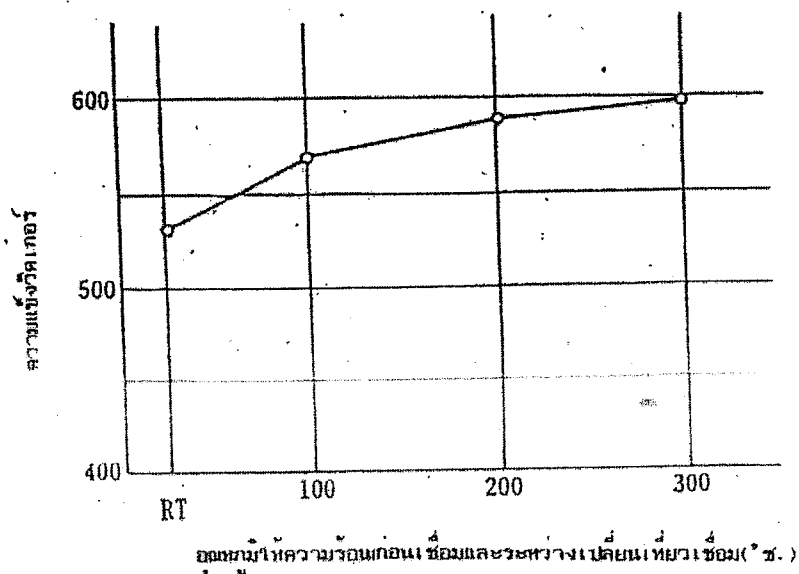
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนเชื่อม และความแข็งแรงของรอยเชื่อมชนิด มาร์เตนไซต์



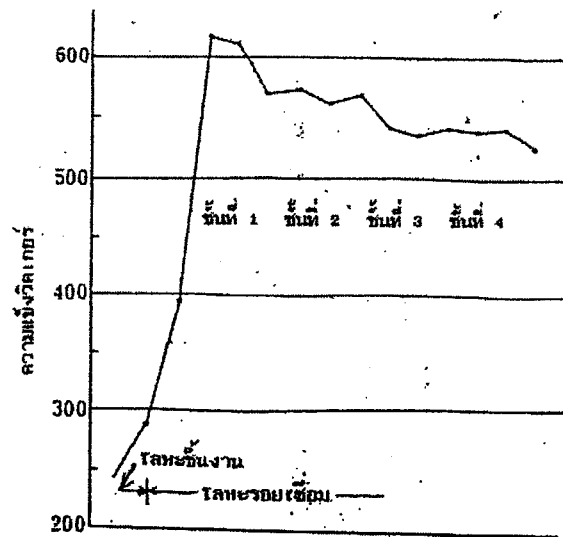
รูปที่ 5.16 แนวโน้มความแข็งแรงของรอยเชื่อมมาร์เตนไซต์ที่อบคืบตัวที่อุณหภูมิกำหนดไว้ในเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงให้เย็นในอากาศ



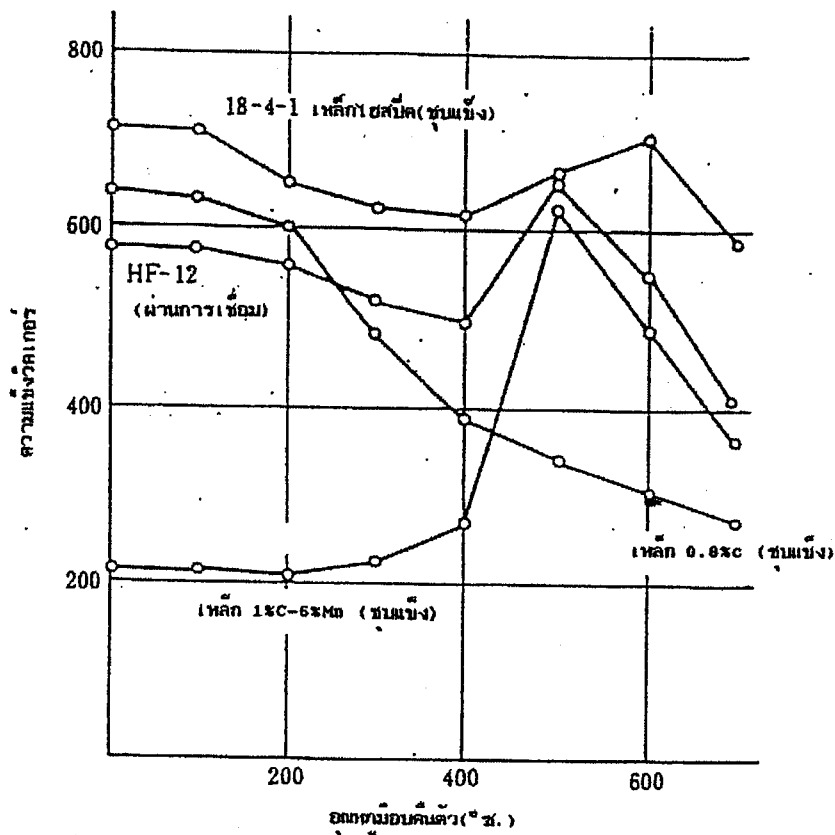
รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบการสึกหรอของรอยเชื่อมพอกผิวแข็งบนปลายของรีปเปอร์



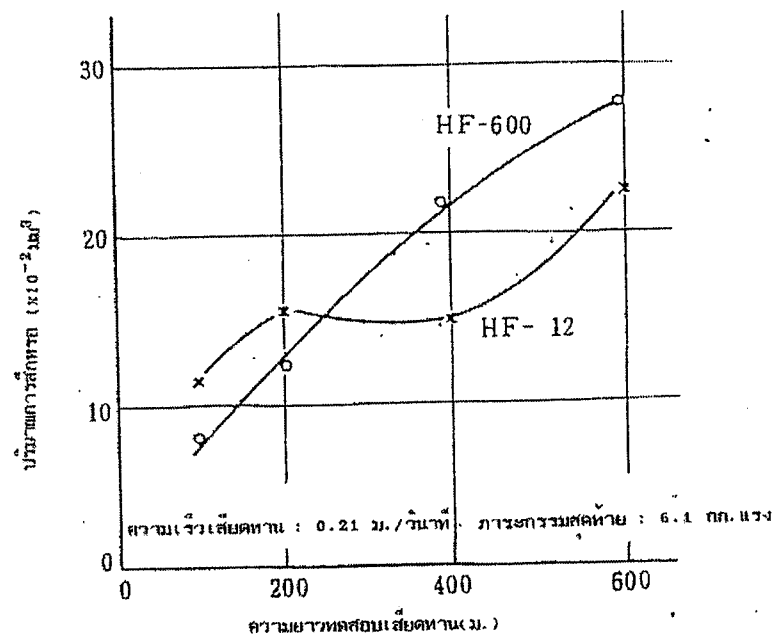
รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนเชื่อม และความแข็งแรงของรอยเชื่อม HF-12



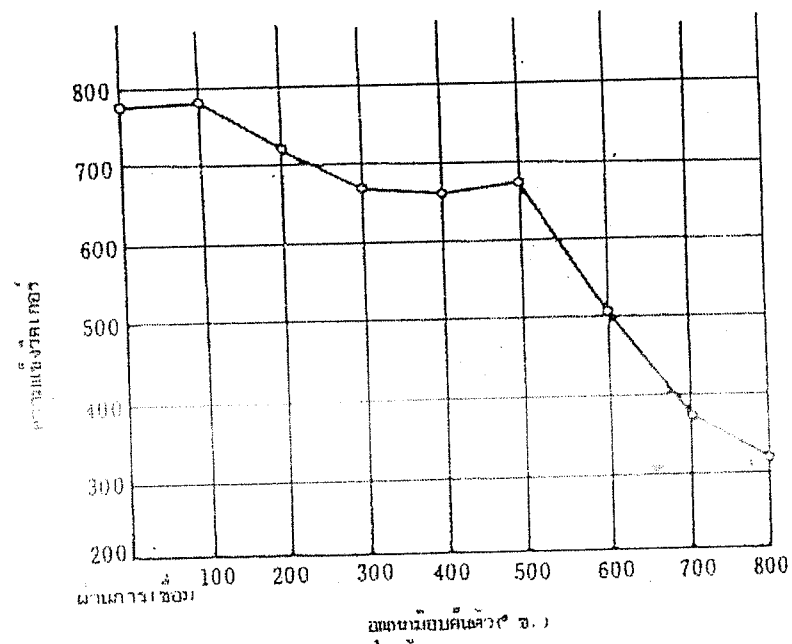
รูปที่ 5.19 แนวโน้มความแข็งแรงของรอยเชื่อมพอกผิวแข็ง HF-12 บนเหล็กตะมูน



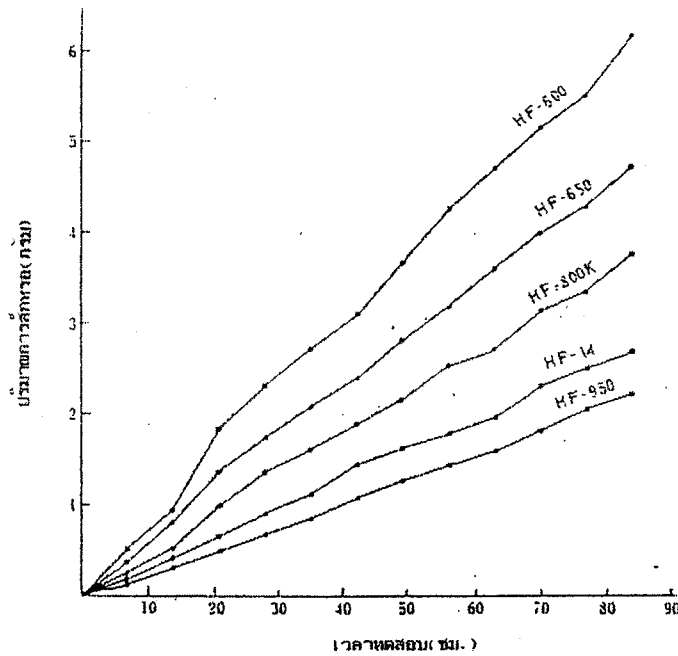
รูปที่ 5.20 ความแข็งแรงที่บ่มคืบแล้วของเหล็กมาร์เทนไซติกและรอยเชื่อม HF-12



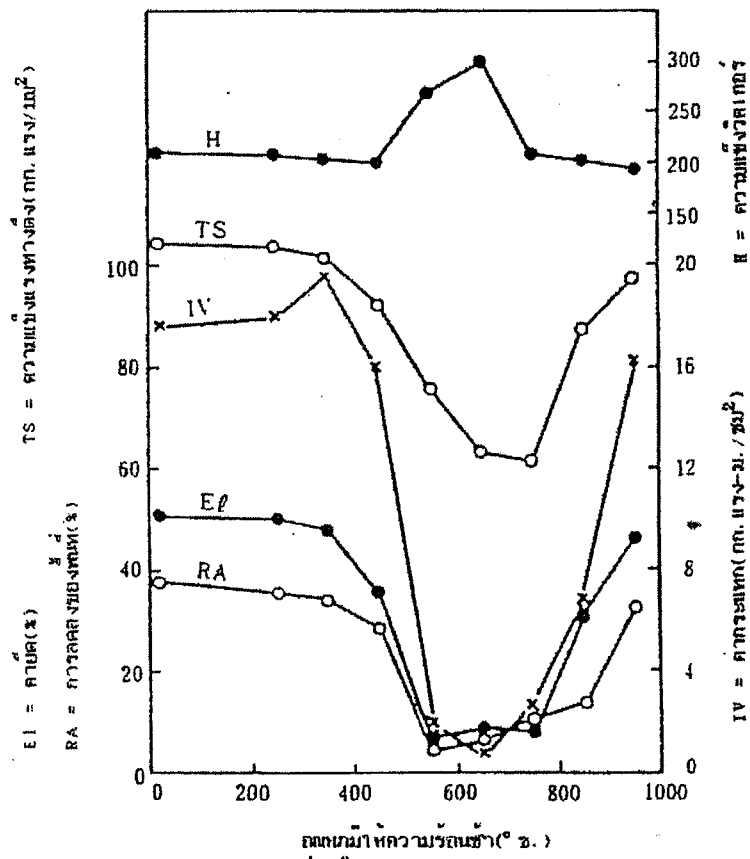
รูปที่ 5.21 ผลการทดสอบการสึกหรอแบบเกาะติดโลหะกับโลหะของรอยเชื่อมมาร์เตนไซต์



รูปที่ 5.22 การแข็งตัวของรอยเชื่อมโบรอน-มาร์เตนไซต์ที่อบคืนตัวแล้ว (HF-800K)

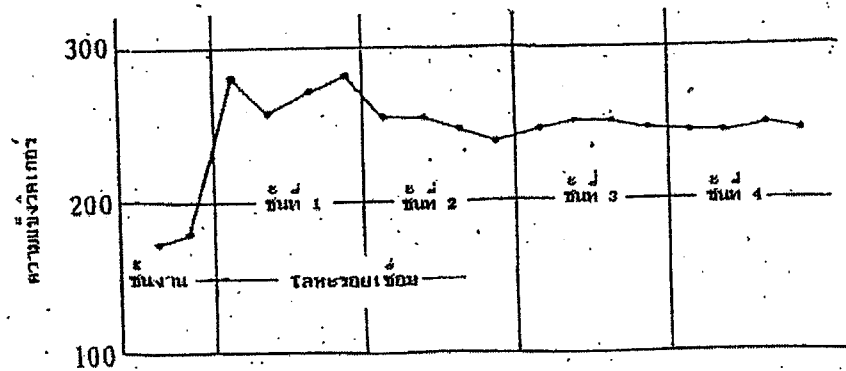


รูปที่ 5.23 ผลของการทดสอบการสีกหรือแบบบดสำหรับรอยเชื่อมต่างๆ

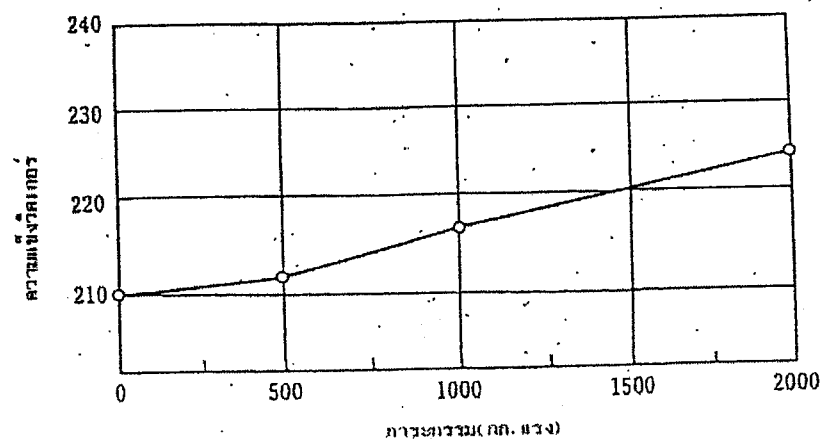


รูปที่ 5.24 แนวโน้มสมบัติทางกลของเกลือลิเทียมไนเตรต 13% ที่ทำให้เหนียวในน้ำ (1050°ซ.)

เมื่ออยู่ในอุณหภูมิให้ความร้อนซ้ำ

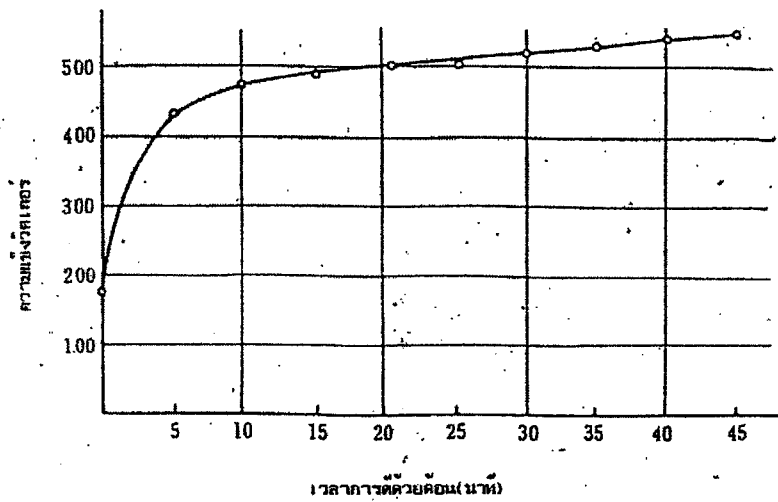


รูปที่ 5.25 แนวโน้มความแข็งแรงของโลหะรอยเชื่อมพอกผิวแข็ง 13%Mn (HF-11) บนเหล็กอะลูมิเนียม

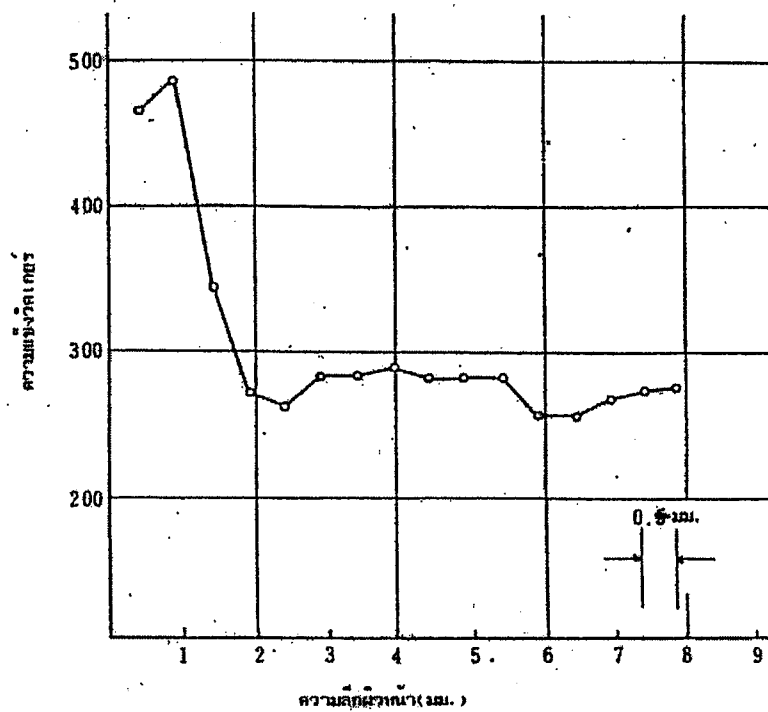


รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของเหล็ก 13%Mn และภาระกรรมทางอัดใน 1 ซม.

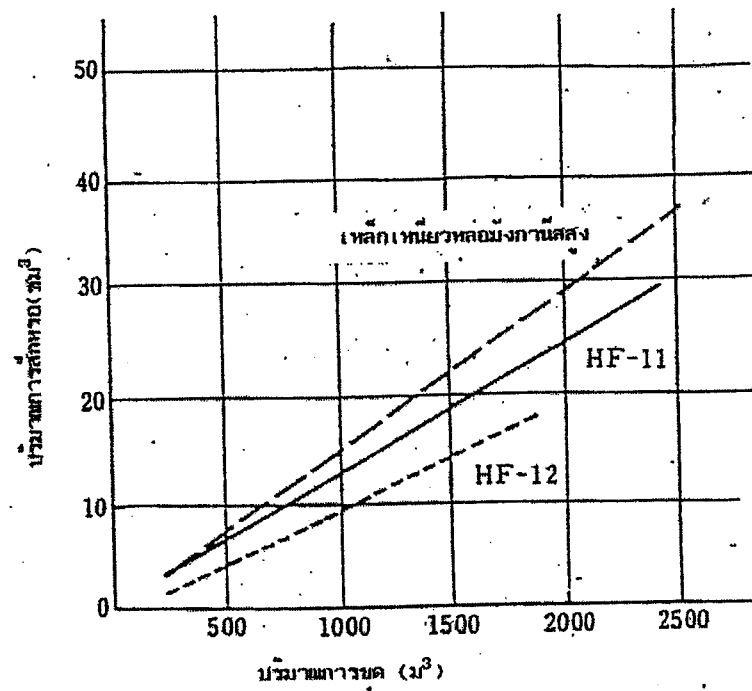




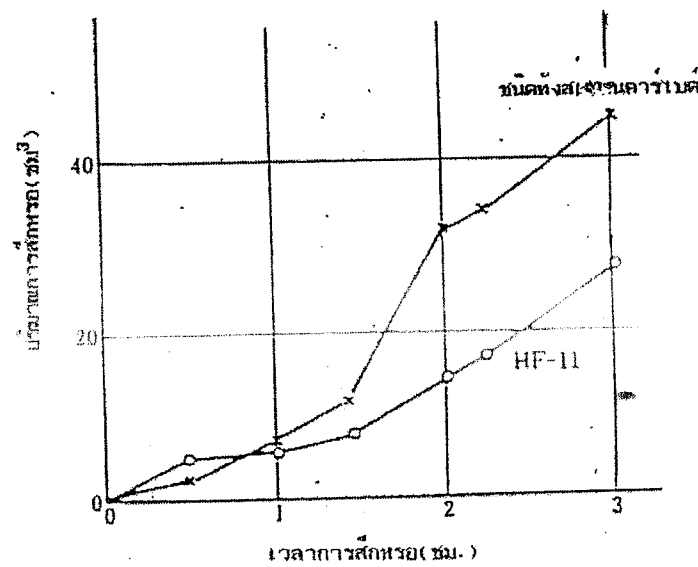
รูปที่ 5.27 การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของโลหะรอยเชื่อม 13Mn (HF-11) โดยใช้ก้อนลม



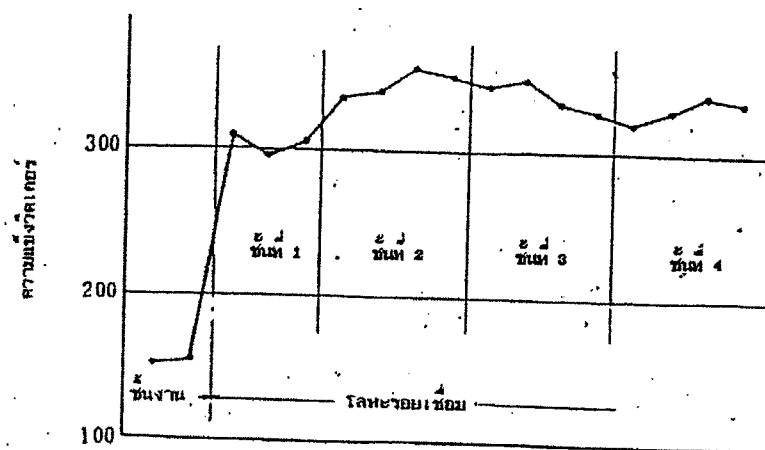
รูปที่ 5.28 ความแข็งแรงที่กระจายตัวของเหล็ก 13%Mn ของตัวหมุนบดที่แข็งตัวจากการใช้งาน



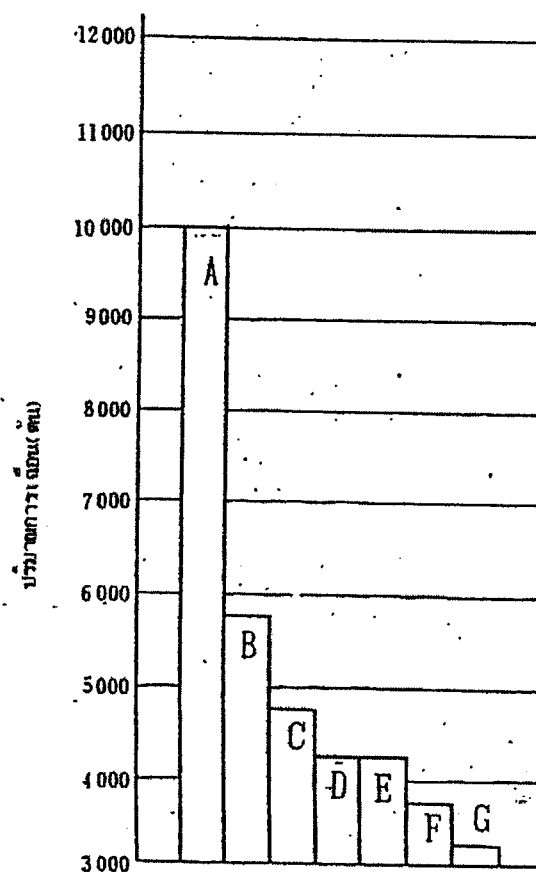
รูปที่ 5.29 การเปรียบเทียบความต้านทานการซึมของเหล็กหล่อมังกานีสสูงและโลหะรอยเชื่อมที่ใช้สำหรับพื้นบั้ง



รูปที่ 5.30 การเปรียบเทียบความต้านทานการซึมของโลหะรอยเชื่อมที่ใช้กับพื้นริบเปอร์



รูปที่ 5.31 แนวโน้มความแข็งของรอยเชื่อมพอกผิวแข็งคาร์บอนสูง 16%Mn-16%Cr บนเหล็กกล้าทน



รูปที่ 5.32 ความทนทานของโลหะรอยเชื่อมในการทดสอบใช้การเฉือนร้อน (โลหะชิ้นงาน : SF-60)

A : โลหะรอยเชื่อม HF-16

E : โลหะรอยเชื่อม CM-9

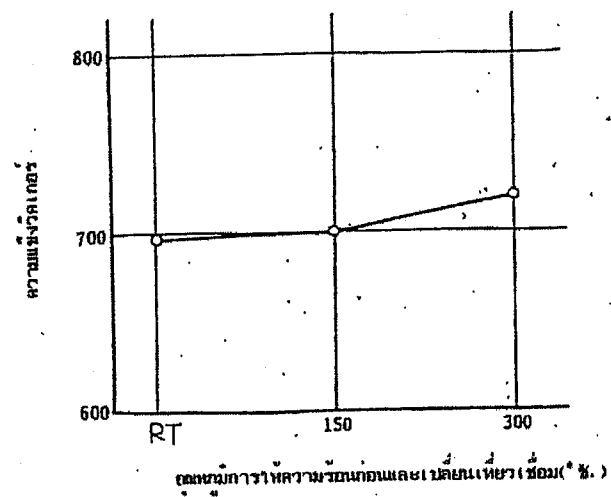
B : โลหะรอยเชื่อม MC-16

F : โลหะรอยเชื่อม CM-S

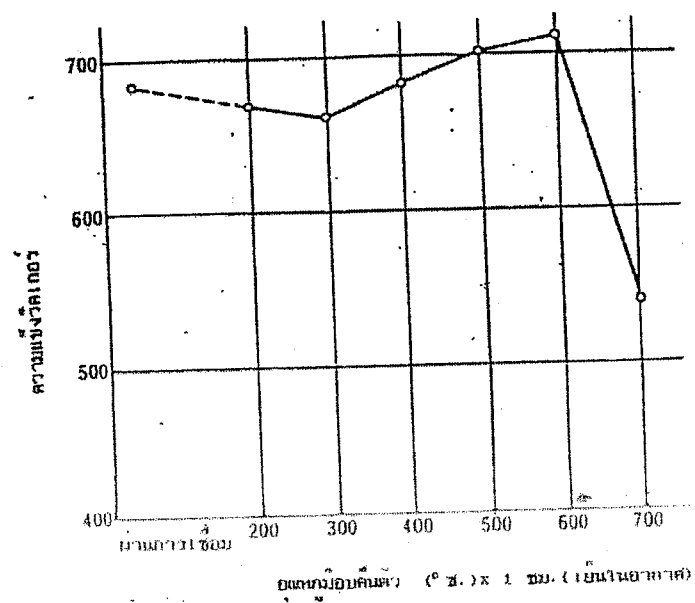
C : เหล็กมาร์เทนไซต์ 13%Cr

G : โลหะชิ้นงาน SF-16

D : โลหะรอยเชื่อม CR-40



รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนเชื่อม  
และความแข็งแรงของรอยเชื่อม HF-14



รูปที่ 5.34 ความแข็งแรงของรอยเชื่อม HF-14 ในฟังก์ชันของอุณหภูมิการรอบคันตัว

ตารางที่ 5.5 อัตราการสึกหรอโดยการทดสอบการขัดถู เวท-คาร์บอนคัม

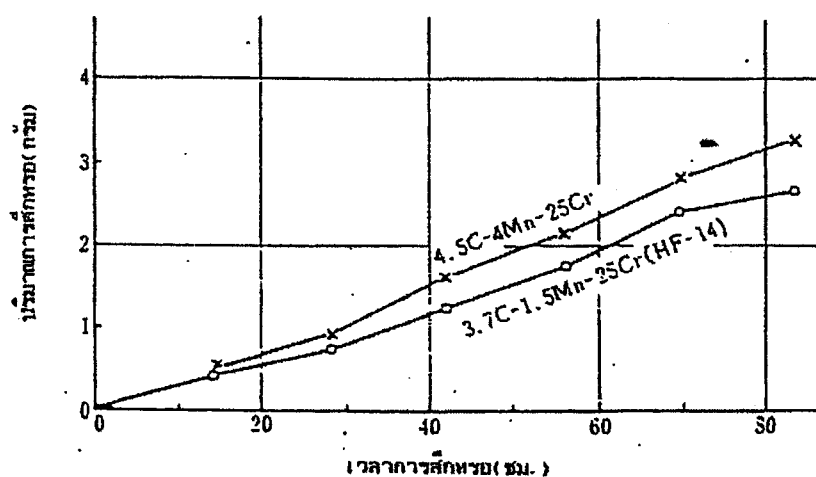
โลหะเดิม	อัตราการสึกหรอ
ชนิด โบรอน-มาเทนไนติก	0.35-0.40
ชนิดมาร์เทนไนติก	0.45-0.55

หมายเหตุ :

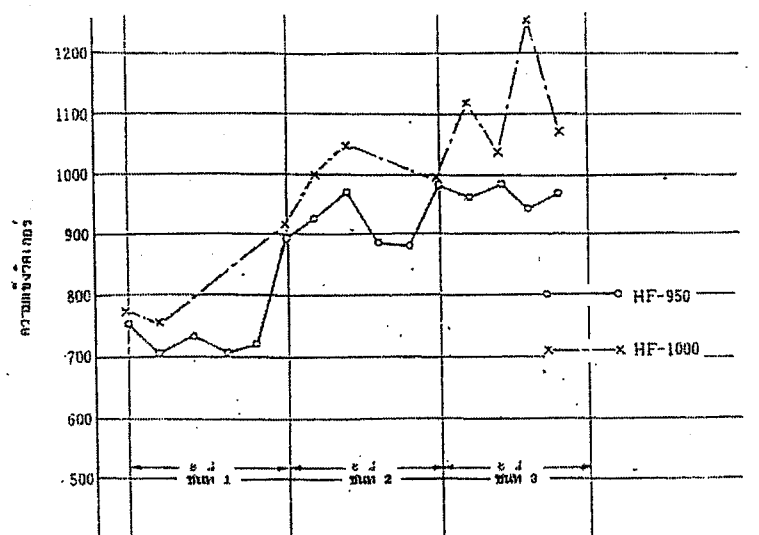
$$\text{อัตราการสึกหรอ} = \frac{\text{การลดลงของน้ำหนักของชิ้นทดสอบ}}{\text{การลดลงของน้ำหนักของรอยเชื่อมเฟลิร์ไลติก}}$$

ตารางที่ 5.6 อายุการใช้งานของฝาครอบเครื่องปั๊มที่พอกผิวแข็ง

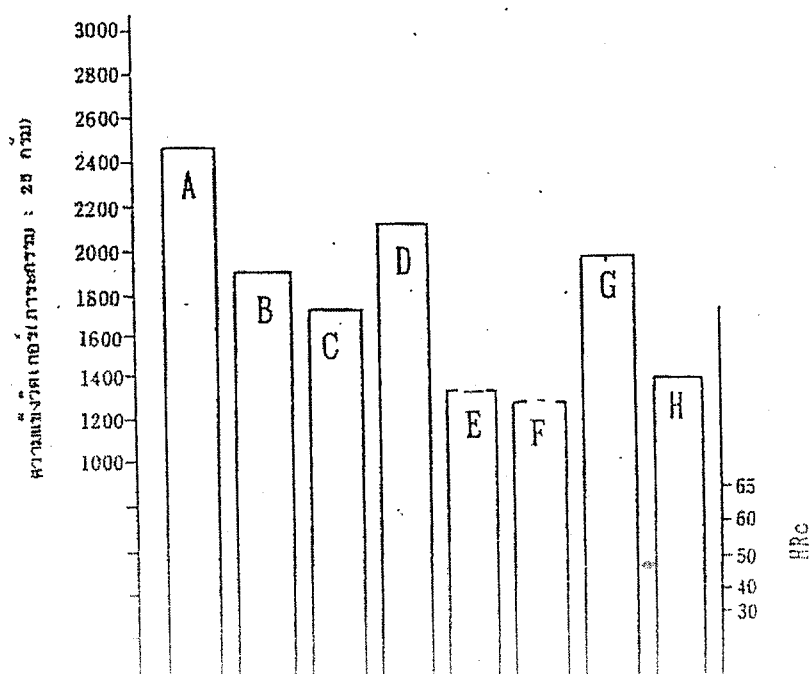
อิเล็กทรอนิกส์	อายุการใช้งาน	ปริมาณการปั๊ม	ค่าเฉลี่ย ปริมาณการปั๊ม	หมายเหตุ
HF-12	650 Hr	131,500 m <sup>3</sup>	202.3 m <sup>3</sup> /h	เชื่อมขั้วระหว่างการใช้งาน
ชนิดมาร์เทนไนติก (A)	600	114,000	190.0	เชื่อมขั้วระหว่างการใช้งาน
ชนิดมาร์เทนไนติก (B)	600	84,100	168.2	ไม่เชื่อมขั้วระหว่างการใช้งาน
HF-14 และ HF-800K	940	191,000	203.2	ไม่เชื่อมขั้วระหว่างการใช้งาน



รูปที่ 5.35 ความต้านทานของโลหะรอยเชื่อมโครเมียมสูงที่มีต่อการขัดถูแบบบด



รูปที่ 5.36 การกระจายตัวของความแข็งของโลหะรอยเชื่อมทั้งสแตน-คาร์ไบด์



รูปที่ 5.37 ความแข็งของคาร์ไบด์ในโลหะรอยเชื่อมชนิดต่างๆ

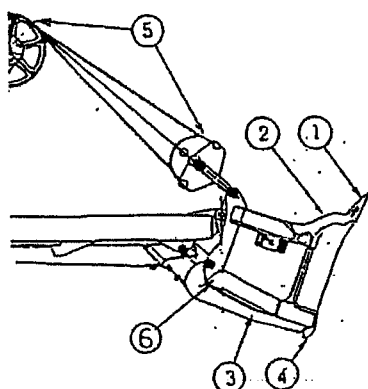
- |  |  |
|--|--|
| A : เกรนทั้งสแตนคาร์ไบด์                         | E : คาร์ไบด์ใน Cr-Mo มาร์เทนไซต์                   |
| B : ทั้งสแตนคาร์ไบด์                             | F : คาร์ไบด์ใน Cr-Ni มาร์เทนไซต์                   |
| C : ฟลักควอทซ์ (สำหรับอ้างอิง)                   | G : คาร์ไบด์ใน Cr-Co-W ( $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ) |
| D : โครเมียมคาร์ไบด์ ( $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ) | H : $\text{Fe}_3\text{C}$                          |

ตารางที่ 5.7 การเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของผิวหน้ารอยเชื่อมบนมิดดัดของเครื่องคราด

การเชื่อมพอกผิวแข็ง	การสึกหรอของคมมีดต่อ 10,000 ม <sup>3</sup>
ไม่เชื่อมพอกผิวแข็ง	85 mm
ชนิดเฟลิร์ไลติก	45
ชนิดมาร์เทนไซต์	21
HF-650 และ HF-950	9

ตารางที่ 5.8 ส่วนประกอบของดิฟเปอร์ (dipper)

หมายเลข	ชื่อ	ชนิดของเหล็ก	Ceq
①	ฟันดิฟเปอร์	มังกานีสสูง	-
		คาร์บอนปานกลาง, เหล็กโครเมียมต่ำ	0.65-0.75
②	ดิฟเปอร์หน้า	มังกานีสสูง	-
③	แท่งสลัก	เหล็กคาร์บอนต่ำ	0.20-0.30
		เหล็กคาร์บอนปานกลาง (0.4-0.5%C)	0.55-0.65
④	ตัวเก็บแท่งสลัก	มังกานีสสูง	-
⑤	ล้อถูกรอก	เหล็กคาร์บอนปานกลาง (0.3-0.45%C)	0.40-0.55
		เหล็กเหนียวหล่อ	-
⑥	ประตูดิฟเปอร์	เหล็กคาร์บอนต่ำ	0.20-0.30
		เหล็กทนแรงดึงสูง (60-80 กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	0.20-0.40



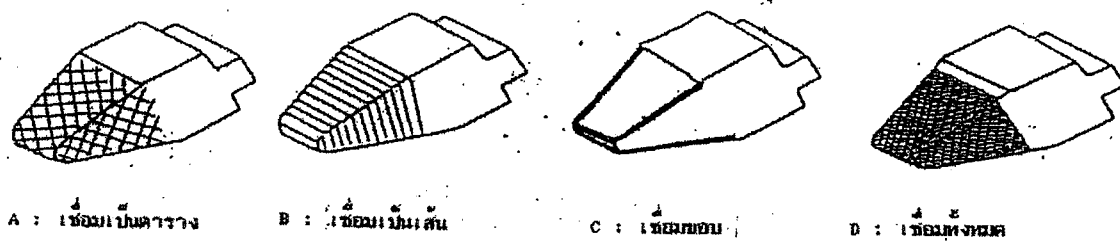
ตารางที่ 5.9 วิธีดำเนินการเชื่อมสำหรับการซ่อมหน้าคิปเปอร์

พื้นที่การซ่อมแซม	ได้ชั้นเชื่อม	การพอกผิวแข็ง	การเชื่อมพอกชั้น
ขอบ	MC-16 หรือ NC-39	HF-600	ทั้งหมด
ด้านหน้าบน	MC-16 หรือ NC-39	HF-600	ทั้งหมดหรือ เป็นตาราง

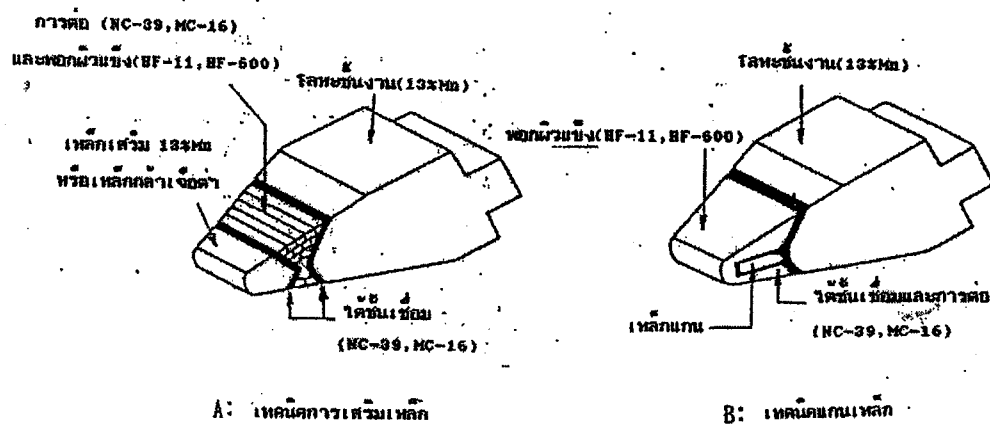
ตารางที่ 5.10 วิธีดำเนินการเชื่อมสำหรับซ่อมพื้นคิปเปอร์มังกานีสสูง

วัสดุขุด	ได้ชั้นเชื่อมและการต่อ	การพอกผิวแข็ง	การตกแต่ง	
			อิเล็กโทรด	การเชื่อมพอก
กรวด, หิน, และดินแข็ง	MC-16 หรือ NC-39	HF-11	HF-600 หรือ HF-12	เป็นตาราง
ดินแตกร่วน		HF-600	HF-950 หรือ HF-14	ขอบหรือ เป็นตาราง





รูปที่ 5.38 เทคนิคต่างๆ ของการเชื่อมพอกผิวแข็ง



รูปที่ 5.39 เทคนิคต่างๆ ของการซ่อมพื้นคิปเปอร์ที่สึกหรออย่างมาก

ตารางที่ 5.11 วิธีดำเนินการเชื่อมสำหรับการซ่อมพื้นคิปเปอร์ธาตุเจือดำ

วัสดุขั้ว	การให้ความร้อนก่อน	ได้ชั้นเชื่อมและการต่อ	การพอกผิวบน	อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเกี่ยวข้อง
เปราะ	200-250°C	LB-26	HF-700 หรือ HF-650	200°C ต่ำสุด
แข็ง	200-250°C	LB-26	HF-600	150°C ต่ำสุด

หมายเหตุ : การตกแต่ง สามารถทำได้เช่นในตารางที่ 7.2

ตารางที่ 5.12 วิธีดำเนินการเชื่อมสำหรับการซ่อมแท่งสลัก (latch bar)

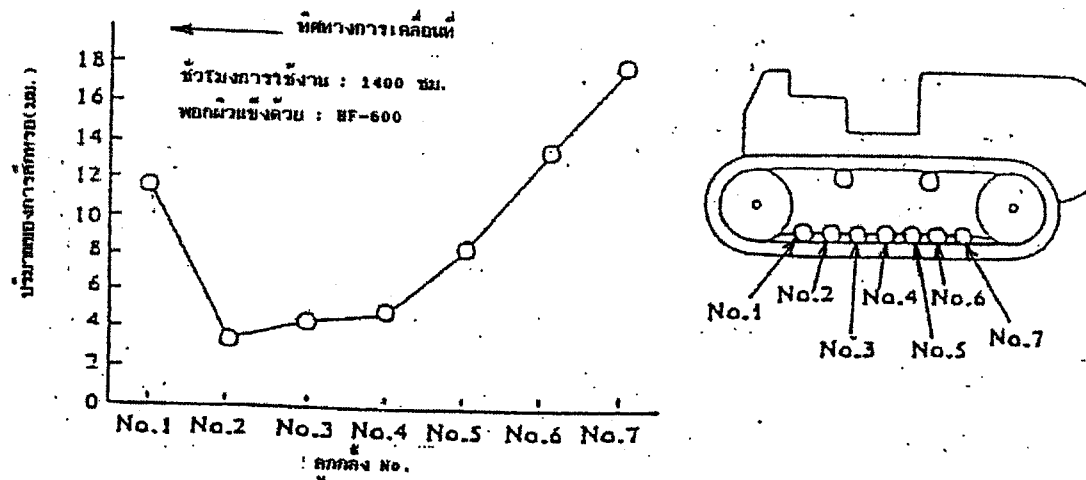
อุณหภูมิการให้ความร้อนก่อน	ได้ชั้นเชื่อม	การพอกผิวแข็ง
Over 200°C	LB-26	HF350 หรือ HF-600

ตารางที่ 5.13 วิธีดำเนินการเชื่อมสำหรับการซ่อมตัวเก็บแท่งสลัก (latch keeper)

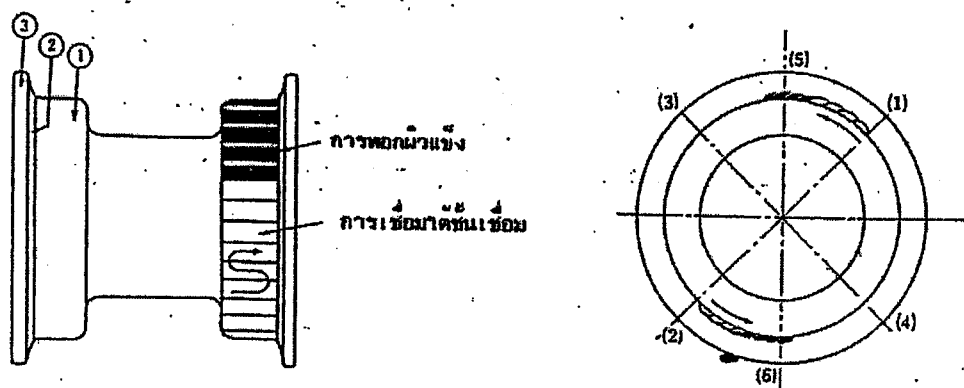
ได้ชั้นเชื่อม	การพอกผิวแข็ง
MC-16 หรือ NC-39	HF-600

ตารางที่ 5.14 วิธีดำเนินการเชื่อมสำหรับการซ่อมลูกกลิ้ง (track rollers)

ชนิดของ รถปราบดิน	การให้ ความร้อนก่อน	ได้ชั้นเชื่อม	การพอกผิวแข็ง		
			ลูกกลิ้งหน้าและหลัง	ลูกกลิ้งตัวกลาง	หน้าแปลน
รถปราบดิน ใช้งานเบา	250°C ต่ำสุด	LB-26	HF-600 หรือ HF-500	HF-350	HF-350
รถปราบดินใช้ งานหนัก	250°C ต่ำสุด	HF-260	HF-700 หรือ HF-650	HF-600 หรือ HF-12	HF-350



รูปที่ 5.40 การตีกรอของลูกยิงแต่ละตัว



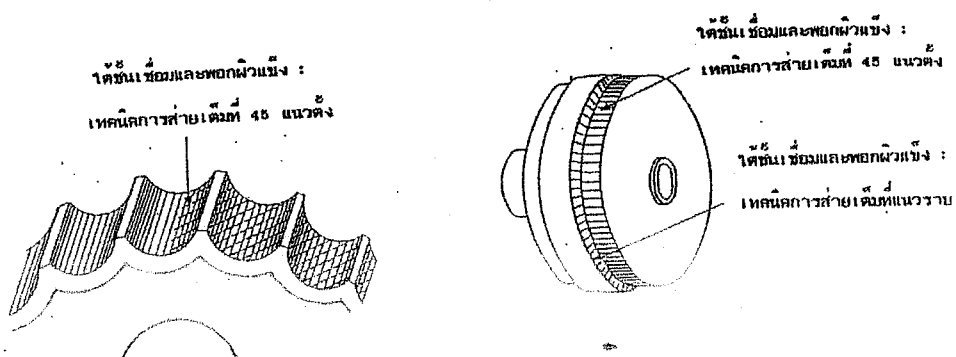
รูปที่ 5.41 การเชื่อมแบบสมนัยต่อลูกยิง

ตารางที่ 5.15 วิธีดำเนินการเชื่อมสำหรับการซ่อมจากโซ่และตัวอิสระ (Sprocket and idler)

ชนิดของรถปราบดิน	การให้ความร้อนก่อนเชื่อม	ได้ชั้นเชื่อม	การพอกผิวแข็ง
รถปราบดินงานเบา	150-250°C	LB-26	HF-350 หรือ HF-500
รถปราบดินงานหนัก	150-250°C	HF-260	HF-500 หรือ HF-600

ตารางที่ 5.16 วิธีดำเนินการเชื่อมสำหรับการซ่อมข้อต่อ (track link)

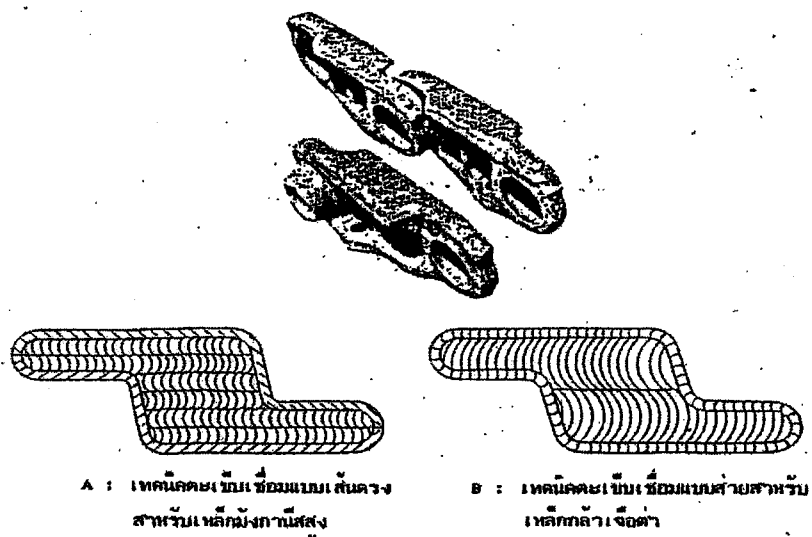
ชนิดของรถปราบดิน	การให้ความร้อนก่อนเชื่อม	ได้ชั้นเชื่อม	การพอกผิวแข็ง
รถปราบดินงานเบา	250°C ต่ำสุด	LB-26	HF-600 หรือ HF-12
รถปราบดินงานหนัก	250°C ต่ำสุด	HF-260	HF-12 หรือ HF-700



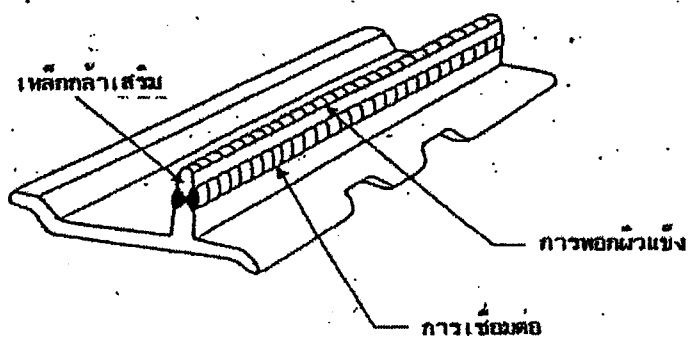
A : จานโซ่

B : ตัวอิสระ

รูปที่ 5.42 วิธีการเชื่อมสำหรับจานโซ่และตัวอิสระ



รูปที่ 5.43 การเชื่อมพอกผิวแข็งข้อต่อ



รูปที่ 5.44 การเชื่อมซ่อมดินตะขาบ (Shoe)

## ภาคผนวก

## การเลือกใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

### 1. มาตรฐานของอิเล็กโทรดสำหรับการเชื่อม

มาตรฐานต่าง ๆ ที่ถูกนำมาใช้ในที่นี้มีอักษรย่อดังนี้

JIS : มาตรฐานอุตสาหกรรมของญี่ปุ่น (Japanese Industrial Standard)

AWS : สมาคมงานเชื่อมแห่งสหรัฐอเมริกา (American Welding Society)

TIS : มาตรฐานอุตสาหกรรมของไทย (Thai Industrial Standard)

### 2. การแบ่งชนิดของอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์

การแบ่งชนิดของอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์จะสัมพันธ์กับมาตรฐานต่าง ๆ ที่แสดงอยู่ในแต่ละหน้าของหนังสือคู่มือเล่มนี้

การแบ่งชนิดทั้งหมดถูกกำหนดให้อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ต่าง ๆ มีความถูกต้องตามข้อบังคับให้มีสมบัติทางกลและ/หรือทางเคมี ของมาตรฐานต่าง ๆ ข้างต้น ยกเว้นข้อบังคับบางอย่างเช่น ขนาด , ความยาว , เครื่องหมาย และแบบที่เหมือนกัน

สัญลักษณ์การแบ่งชนิดที่แสดงอยู่ในวงเล็บ เช่น JIS(D4313) , AWS(E.6013) และอื่น ๆ หมายความว่าอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์นี้อยู่ในชนิดที่ได้ตามข้อบังคับสมบัติทางกลและทางเคมีตามรายละเอียดที่กำหนดของมาตรฐานข้างต้นอย่างมากที่สุดแม้ว่าบางส่วนของข้อบังคับทางกลและทางเคมีจะไม่ถึงขนาดที่ต้องการก็ตาม

### 3. สภาพเงื่อนไขการทดสอบ

สภาพเงื่อนไขการทดสอบสมบัติทางกลและความแข็ง มีดังต่อไปนี้

1. ถ้าไม่มีข้อกำหนดไว้ , การหาค่าการกระแทก (Impact value ) ของการทดสอบชาร์ปี ร่องบากวี 2 มม. จะถูกกระทำที่ 0°ซ.
2. ถ้าไม่มีข้อกำหนดไว้ , การทดสอบแรงดึงและความแข็งจะถูกกระทำที่อุณหภูมิห้อง
3. ถ้าไม่มีข้อกำหนดไว้ , การทดสอบทางกลและความแข็งของเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะถูกกระทำในสถานะที่ผ่านการเชื่อมมาแล้วโดยไม่มีการกระทำทางความร้อนหลังการเชื่อม (aswelded condition)
4. ถ้าไม่มีข้อกำหนดไว้ , กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม (postweld heat treatment) จะกระทำโดยการให้เย็นตัวลงในเตาอบ
5. ความยาวของเกจ (gauge length) ของชิ้นงานทดสอบแรงดึงเป็นดังนี้ เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 x D สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 5 x D สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น

6. ถ้าไม่มีข้อกำหนดไว้, แหล่งกำลังงานเชื่อมจะใช้กระแสไฟฟ้าสลับ (AC.)

คำย่อและคำอธิบาย

คำย่อ	คำอธิบาย (ไทย)	คำอธิบาย (อังกฤษ)
AC	กระแสไฟฟ้าสลับหรือการเย็นลงในอากาศ	Alternating current or Air Cooling
Amp	แอมแปร์	Ampere
AP	ทุกแนวการเชื่อม	All-position
AW	การเชื่อมไม่มีการทำความร้อนหลังเชื่อม	As-welded
Bal	ส่วนที่เหลือ	Balance
CP	ขั้วคงที่	Constant potential
CR	อัตราการเย็นตัว	Cooling rate
DBE	ระยะทางระหว่างอิเล็กโทรด	Distance between electrodes
DC	กระแสไฟตรง	Direct current
DC-EN	กระแสไฟตรงอิเล็กโทรดขั้วลบ	Dc . electrode negative
DC-EP	กระแสไฟตรงอิเล็กโทรดขั้วบวก	Dc, electrode positive
Dia	เส้นผ่าศูนย์กลาง	Diameter
DPBS	ที่ขั้วเชื่อมคู่บนทั้งสองด้าน	Double passes on both sides
EGW	การเชื่อมอาร์คอิเล็กโทรดแก๊ส	Electrode gas arc welding
EI	ความยืดตัว	Elongation
ESW	การเชื่อมอิเล็กโทรดสแลก	Electroslag welding
Ext	ส่วนยื่นของเส้นลวดเชื่อม	Extension of wire
F	แนวราบ	Flat position
FC	การเย็นลงในเตาอบ	Furnace cooling
FCW	เส้นลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์	Flux cored wire
GD	การออกแบบร่องเชื่อม	Groove design
GS	ขนาดร่องเชื่อม	Groove size
H	แนวระดับ	Horizontal position
HAZ	บริเวณกระทบร้อน	Heat-affected zone
HF	แนวระดับต่อฉาก	Horizontal fillet
HI	ความร้อนเข้า	Heat input



## คำย่อและคำอธิบาย (ต่อ)

คำย่อ	คำอธิบาย (ไทย)	คำอธิบาย (อังกฤษ)
HT	ทนแรงดึงสูง	High tensile
Hv	ความแข็ง (วิกเกอร์)	Hardness (vickers)
IPT	อุณหภูมิระหว่างเชื่อม	Interpass temperature
IV	ค่าการกระแทก	Impact value
L	ความยาว	Length
(L)	สายไฟถ่ออิเล็กโทรด	Leading electrode
LD	รายละเอียดชั้นเชื่อม	Layer detail
MAG	การเชื่อมแม็ก	Metal active gas
MIG	การเชื่อมมิก	Metal inert gas
ML	ชั้นเชื่อมหลายชั้น	Multi-layer
MP	แผ่นชิ้นงาน	Mother plate
MS	เหล็กละมุน	Mild steel
NL	จำนวนชั้นเชื่อม	Number of layer
NE	จำนวนอิเล็กโทรด	Number of electrode
OAW	การเชื่อมก๊าซออกซิอะเซทิลีน	Oxyacetylene welding
OD	เส้นผ่านศูนย์กลางนอก	Outer diameter
OQ	การชุบน้ำมัน	Oil quenching
OS	ความแข็งแรงออฟเซต	Offset strength
OSW	การเชื่อมด้านเดียว	One-side welding
POL	ขั้วไฟฟ้า	Polarity
P/L	หนึ่งเที่ยวเชื่อมหรือหลายเที่ยวเชื่อมต่อชั้นเชื่อม	Pass or passes per layer
Pre.h	การให้ความร้อนก่อนการเชื่อม	Preheat
PT	ความหนาแน่นชิ้นงาน	Plate thickness
PWHT	กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม	Postweld heat treatment
RA	การลดลงของพื้นที่	Reduction of area
RG	ช่องว่างที่ฐาน	Root gap
RT	อุณหภูมิห้อง	Room temperature
SAW	การเชื่อมอาร์คฟลักซ์คลุม	Submerged arc welding


## คำย่อและคำอธิบาย (ต่อ)

คำย่อ	คำอธิบาย (ไทย)	คำอธิบาย (อังกฤษ)
SWAW	การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค	Shielded metal arc welding
SPBS	เที่ยวเชื่อมเดียวบนทั้งสองด้าน	Signle pass on both sides
SR	การลดความเค้น	Stress relief
SW	เส้นลวดเชื่อมไส้ตัน	Solid wire
(T)	การลากอิเล็กโทรด	Trailing electrode
TIG	การเชื่อมทิก	Tungsten inert gas
TS	ความแข็งแรงทางดึง	Tensile strength
TT	อุณหภูมิทดสอบ	Test temperature
Volt	แรงดัน (โวลต์)	Voltage
V	แนวตั้งขึ้น	Vertical-up position
VD	แนวตั้งลง	Vertical-down position
VU	แนวตั้งขึ้น	Vertical-up position
WM	วิธีการเชื่อม	Welding method
WP	แนวการเชื่อม	Welding position
WQ	การชุบน้ำ	Water quenching
YP	จุดคราก	Yield point

## สารบัญทั้งหมด

### 1. อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์

 สำหรับเหล็กละมุนและเหล็กทนแรงดึงสูง 50 กก. – แรง / มม.<sup>2</sup>

 สำหรับเหล็กทนแรงดึงสูง 60 – 80 กก. – แรง/มม.<sup>2</sup>

 สำหรับเหล็กที่ใช้งานในอุณหภูมิต่ำ

 สำหรับเหล็กกล้าเชื่อมต้านความร้อน

 สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม

 สำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง

 สำหรับเหล็กหล่อ

สำหรับทองแดงและทองเหลือง

สำหรับนิกเกิลและนิกเกิลเจือ

### 2. ข้อมูลอ้างอิง

- การเก็บรักษาและการอบแห้งสำหรับอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์
- น้ำหนักต่อหน่วยโดยประมาณ
- ตารางแปลงหน่วย

## สารบัญ

	ชื่อผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		หน้าที่
		JIS	AWS	
	สำหรับเหล็กแผ่นและเหล็กท่อนแรงดึงสูง 50 กก. – แรง / มม. <sup>2</sup>			
	RB - 26	Z 3211 D 4313	A5.1 E6013 TIS E43 OR 11 E43 1 R 11 E43 2 R 11	232
	TB - 43	D 4303	E 6013	233
	B - 14	D 4301	-	234
	B - 17	D 4301	-	235
	LB - 26	D 4316	E 7016	237
	LB - 52	Z 3212 D 5016	E 7016 TIS 514B26	238
	LB - 52 U	Z3211 D 4316	E 7016	239
	LB - 52 - 18	Z 3212 D 5016	E 7018	241
	KOBE - 6010	Z 3211 -	E 6010	242
	ZERODE - 27	D 4327	E 6027	243
	LB - 52F	Z 3212 D 5016	E 7048	240
	LB - 52A	D 5016	E 7016	245
	LTB - 50	D 5003	-	244
	LBW - 52	DA 5016 G	-	245

## สารบัญ (ต่อ)

	ชื่อผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		หน้าที่
		JIS	AWS	
	สำหรับเหล็กทนแรงดึงสูง 60 – 80 กก. – แรง/มม. <sup>2</sup>			
	LB - 62	Z 3212 D 5816	A5.5 E 9016 G	247
	LB - 106	D 7016	E 10016 -G	249
	LB - 116	D 8016	E 11016 -G	248
	สำหรับเหล็กที่ใช้งานในอุณหภูมิต่ำ			
	LB – 52 NS	Z 3212 D 5016	A5.5 E 7016 - G	251
	NB.1	Z 3241 DL 5016 –C -1	E 8016 -G	253
	NB.2	DL 5016 –C - 2	E 8016 C1	254
	NB – 3N	DL 5016 – D -3	E 7016 – G	254
	สำหรับเหล็กกล้าเจือต่ำทนความร้อน			
	BL - 70	Z 3212 D 5001	-	261
	BL - 76	D 5016	A5.1 E 7016	261
	BL – 96	-	A5. 5 E 9016- G	261
	BL-106	-	A5. 5 E 10016- G	262
	CMA-76	Z 3223 DT 1216	A5.5 E 7016 – A1	255
	CMA - 96	DT 2316	E 8016-B2	257

	ชื่อผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		หน้าที่
		JIS	AWS	
	สำหรับเหล็กกล้าเจือดำทนความร้อน (ต่อ)			
	CMA-106	DT 2416	E 9016 - B 3	258
	CM -5	DT- 2516	A 5.4 E 502-16	259
	สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม			
	NC - 38	Z 3221 D 308 - 16	A 5.4 E 308-16	263
	NC - 38L	D 308L - 16	E 308L - 16	264
	NC - 39	D 309 - 16	E 309 - 16	265
	NC - 39L	D 309L - 16	E 309L - 16	267
	NC - 36	D 316 - 16	E 316- 16	268
	NC - 36L	D 316L - 16	E 316 L - 16	269
	CR - 40	D 410 - 16	E 410-16	270
	CR - 40 Cb	D 410 Nb-16	E 410 - 16	
	CR - 43	D 430 - 16	E 430 - 16	271
	CR - 43 Cb	D 430 Nb-16	E 430 -16	
	NC-39 Mol	D 309 Mol-16	E 309 Mo-16	273
	NC -30	D 310 - 16	E 310 - 16	273
	NC - 37	D 347 - 16	E 347 - 16	274
	NC - 37L	D 347 L - 16	E 347 - 16	274
	สำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง			
	HF -240	Z 3251 DF 2A - 250-R	-	276
	HF - 260	DF 2A - 300 - B	-	287
	HF - 330	DF 2A - 350 -R	-	287
	HF - 350	DF - 2A - 400 - B	-	277

	ชื่อผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		หน้าที่
		JIS	AWS	
	สำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง (ต่อ)			
	HF - 450	DF 2A-450 - B	-	287
	HF - 500	DF 2B - 500 - B	-	279
	HF - 600	DF 2B - 600 - B	-	280
	HF - 650	DF 3C - 600 - B	-	281
	HF - 800 K	DF 3C - 700 - B	-	282
	HF - 11	DF MA-250-B	-	284
	HF - 12	DF 3C - 500-B	-	285
	HF - 16	DF ME-300-B	-	285
	MC -16		-	283
	สำหรับเหล็กหล่อ			
	CIA-1	Z 3252 DF C Ni	A5.15 Eni-CI	291
	CIA-2	DF C ni Fe	ENI Fe - CI	291
	CIA-3	DF C Fe	(Est.)	291
	สำหรับทองแดงและทองแดงเจือ			
	CS-30	Z 3231 D Cu Si B	A5.6 (E Cu Si)	294
	CP-33	D Cu Sn A	E Cu Sn-A	294
	CAN-60	D Cu Al Ni	(E Cu Al-A2)	294
	สำหรับนิกเกิลและนิกเกิลเจือ			
	MEL-34	Z 3224 D Ni Cu-1	-	296
	MEL-70	D Ni Cu-4	A5.11 E Ni Cu-7	296
	NIC-70A	D Ni Cr Fe-1J	E Ni Cr Fe-1	296
	NIC - 703D	D Ni Cr Fe-3	E Ni Cr Fe-3	297

การเก็บรักษาและการอบแห้งสำหรับอิเล็กทรอนิกส์	299
ตารางแสดงน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์	302
ตารางแสดงค่าความแข็ง	310
ตารางแสดงค่าความเค้น	313
ตารางแสดงค่าพลังงานค่ากระแทก	314
ตารางเปรียบเทียบอุณหภูมิ	315
ตารางแสดงค่าความยาว , น้ำหนัก , หน่วยเอสไอ	317



## RB -26

สำหรับการเชื่อมเหล็กแผ่นบางและเหล็กโครงสร้างที่บาง ๆ

การนำไปใช้งาน :

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คสำหรับโครงสร้างเหล็กแผ่นบางในเรือเดินทะเล , รถไฟ และ รถยนต์ที่ทำจากเหล็กถมน

คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

RB -26 เป็นอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ชนิดไทตาเนียมสูงซึ่งทำให้การเชื่อมในแนวตั้งลงได้ด้วย อิเล็กโทรดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางได้ถึง 5.0 มม.

RB -26 มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับการเชื่อมงานโครงสร้างซึ่งจำเป็นต้องเชื่อมในแนวตั้งลงเป็นพิเศษในขณะเดียวกันก็เหมาะสำหรับการเชื่อมเหล็กแผ่นบางๆ และเหล็กโครงสร้างบางๆ เพราะว่ามีกริมมิลที่ขึ้น

ข้อควรจำในการใช้งาน

1. ในกรณีของการเชื่อมในแนวตั้งลง การเคลื่อนอิเล็กโทรดควรให้ปลายของอิเล็กโทรดแตะกับแผ่นชิ้นงาน ดังแสดงในภาพสเก็ท
2. ไม่ใช่กระแสไฟสูงเกินไปกว่าช่วงที่เหมาะสม การเชื่อมด้วยกระแสไฟสูงเกินไปไม่เพียงแต่จะทำให้ได้ความสมบูรณ์ในการทะลุผ่านของรังสีเอ็กซ์ที่ต่ำลงแล้วยังทำให้เกิดประกายโลหะเพิ่มมากขึ้น เกิดรอยกินลึก (undercut) และมีการคลุมของตะกรันไม่พอเพียง
3. ทำการอบแห้งอิเล็กโทรดที่ 70-100°ซ. เป็นเวลา 30 – 60 นาทีก่อนการใช้งานการดูดซับความชื้นมากเกินไปทำให้มีความสามารถในการใช้งานที่ต่ำลงและอาจเป็นผลทำให้เกิดรูพรุนขึ้นได้

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)

C	Si	Mn	P	S
0.08	0.26	0.38	0.012	0.012

สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

YP นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	TS นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	EI %
430 (44)	500 (51)	25

ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC,DC – EP or DC-EN)

Dia (มม.)		1.6	2.0	2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
L (มม.)		250	300	350	350	400	400	450
Amp	F & VD	20~	30~	45~	60~	105~	150~	200~
		45	65	95	125	170	220	280
	VU & OH	20~	30~	45~	60~	100~	125~	-
		45	65	95	125	150	190	

**TB -43**

สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นบางและหนาปานกลาง

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็กอะลูมิเนียมที่ถูกใช้สำหรับงานยานยนต์,งานโครงสร้างที่มีขนาดบางและงานอาคาร

คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

**TB -43** เป็นอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ชนิดโลม – โทตาเนีย เหมาะสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นบางและหนาปานกลางในทุกแนวการเชื่อม **TB -43** เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการเชื่อมเต็ม การเชื่อมเว้นระยะ และการเชื่อมต่อนอก อันเนื่องมาจากมีความสามารถอาร์คเข้าและกำจัดตะกรันได้ดีกว่าอิเล็กโทรดชนิดโลม-โทตาเนียแบบอื่น ๆ

ข้อควรจำในการใช้งาน

1. จะต้องไม่ใช้กระแสไฟมากเกินไปกว่าช่วงที่แนะนำไว้ การเชื่อมด้วยกระแสไฟที่สูงเกินไปจะทำให้ความสมบูรณ์ในการทะลุผ่านของรังสีเอ็กซ์ต่ำลง , เกิดประกายโลหะเพิ่มมากขึ้น เกิดรอยกินลึกและการปกคลุมของตะกรันไม่พอเพียง
2. ทำการอบแห้งอิเล็กโทรดที่ 70-100 °ซ. เป็นเวลา 30-60 นาทีก่อนการใช้งานความชื้นมากเกินไปจะทำให้ความสามารถในการใช้งานลดลง และทำให้เกิดรูพูนขึ้นได้

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)

C	Si	Mn	P	S
0.08	0.11	0.33	0.014	0.012

สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

YP	TS	EI	IV
นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	%	จูลย์ (กก.แรง-ม.)
400 (41)	450 (46)	33	110 (11)

ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC, DC – EP or DC-EN)

Dia (มม.)		2.0	2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
L (มม.)		300	350	350	400	400	450
Amp	F	30-60	60-100	100-140	140-190	190-250	250-330
	V & OH	25-55	50-90	90-130	120-170	140-210	-

#### B – 14

สำหรับการเชื่อมงานโครงสร้างขนาดใหญ่ในทุกแนวการเชื่อม  
การนำไปใช้งาน

การเชื่อมแบบคลุมการอาร์คของงานโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น เรือเดินทะเล ตึกสูง ๆ และ  
เครื่องจักรกลที่ทำด้วยเหล็กถนุ

คุณลักษณะพิเศษในการนำไปใช้งาน

B – 14 เป็นอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ชนิดอิลเมไนท์ที่ออกแบบมาให้มีความสามารถในการใช้งานและ  
ความสามารถในการเชื่อมที่ดีกว่า เหมาะสำหรับการเชื่อมต่อน (butt) และการเชื่อมต่อนอก  
(fillet) ในทุกแนวการเชื่อมสำหรับแผ่นชิ้นงานบางหรือหนา (1.6 ถึง 2.0 มม.) ในการเชื่อมแนว  
ระดับต่อนอก การปกคลุมของตะกรันและความเป็นรูปร่างคงที่ของตะเข็บเชื่อมจะดีและรูปร่างของ  
ตะเข็บเชื่อมจะสวยงามมากความสามารถในการใช้งานในการเชื่อมแนวตั้งและแนวเหนือศีรษะจะ  
ดีที่สุดในระหว่างอิเล็กโทรดชนิดอิลเมไนท์ เนื่องจากมีความสมบูรณ์ในการให้รังสีเอ็กซ์ทะลุผ่าน  
ได้ดีและสมบัติทางกลก็ดีด้วยดังนั้น B – 14 จึงได้ถูกเลือกใช้ในการแข่งขันและทดสอบความ  
ชำนาญด้วย

ข้อควรจำในการใช้งาน

1. ไม่ใช่กระแสไฟสูงเกินกว่าช่วงที่เหมาะสม การเชื่อมด้วยกระแสไฟสูงเกินไปไม่  
เพียงแต่จะทำให้ได้ความสมบูรณ์ในการทะลุผ่านของรังสีเอ็กซ์ที่ต่ำลงแล้ว ก็ยังทำให้  
เกิดประกายโลหะเพิ่มมากขึ้น เกิดรอยกินลึกและมีการคลุมของตะกรันไม่พอเพียง
2. ทำการอบแห้งอิเล็กโทรดที่ 70-100°ซ. เป็นเวลา 30-60 นาที ก่อนการใช้งาน การดูด  
ซับความชื้นมากเกินไป ทำให้มีความสามารถในการใช้งานที่ต่ำลง และอาจเป็นผลทำ  
ให้เกิดรูพรุนขึ้นได้
3. การอบแห้งที่มากเกินไปก่อนการใช้งาน เป็นสาเหตุให้ได้การซึมลึกที่น้อยลงและ  
อิเล็กโทรดจะได้รับความร้อนมากเกินไป

4. แผ่นชิ้นงานที่หนาปานกลางและหนามาก ควรจะทำการเชื่อมที่ให้อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมและอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมที่เหมาะสม

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)

C	Si	Mn	P	S
0.10	0.10	0.43	0.017	0.008

สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

YP นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	TS นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	EI %	IV จูลย์ (กก.แรง.-ม.)
400 (41)	460 (47)	32	110 (11)

ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟฟ้าที่แนะนำให้ใช้ (AC,DC – EP or DC-EN)

Dia (มม.)		2.6	3.2	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0
L (มม.)		350	400	450	450	450	450	450	450
Amp	F	55~ 90	85~ 140	130~ 190	155~ 220	180~ 260	240~ 310	300~ 370	350~ 440
	V &	45~	60~	100~	120~	135~	-	-	-
	OH	75	120	160	180	210			

B-17

สำหรับการเชื่อมงานโครงสร้างขนาดใหญ่ในทุกแนวการเชื่อม

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของงานโครงสร้างขนาดใหญ่ ๆ เช่น เรือเดินทะเล ตึกสูง ๆ และเครื่องจักรกลที่ทำด้วยเหล็กถ่วง

### คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

B-17 เป็นอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ชนิดอิลเมไนท์ ซึ่งถูกออกแบบมาให้มีความสามารถในการเชื่อม (weldability) คือเป็นพิเศษ

เนื่องจากมีความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวและการเกิดรูพรุน รวมทั้งรังสีเอ็กซ์ทะลุผ่านได้ดีเยี่ยมในจำพวกอิเล็กโทรดชนิดอิลเมไนท์นี้ ดังนั้น โครงสร้างเหล็กที่มีขนาดใหญ่ถึง 25 มม. จึงสามารถที่จะเชื่อมได้ด้วย B-17

B-17 ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานต่าง ๆ อันเนื่องมาจากความสามารถ (reliability) ที่สูงกว่าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2485 เมื่อ B-17 ได้ถูกปรับปรุงขึ้นมา

### ข้อควรจำในการใช้งาน

1. ไม่ใช้กระแสไฟสูงเกินกว่าช่วงที่เหมาะสมการเชื่อมด้วยกระแสไฟสูงเกินไปไม่เพียงแต่จะทำให้ได้ความสมบูรณ์ในการทะลุผ่านของรังสีเอ็กซ์ที่ต่ำลงแล้ว ก็ยังทำให้เกิดประกายโลหะเพิ่มมากขึ้น เกิดรอยกินลึกและมีการคลุมของตะกรันไม่พอเพียง
2. ทำการอบแห้งอิเล็กโทรดที่ 70-100 °ซ. เป็นเวลา 30-60 นาที ก่อนการใช้งาน การดูดซับความชื้นมากเกินไปทำให้ความสามารถในการใช้งานที่ต่ำลง และอาจเป็นผลทำให้เกิดรูพรุนขึ้นได้
3. การอบแห้งที่มากเกินไปก่อนการใช้งานเป็นสาเหตุให้ได้การซึมลึกที่น้อยลง และอิเล็กโทรดจะได้รับความร้อนมากเกินไป
4. แผ่นชิ้นงานที่หนาปานกลางและหนามากควรจะทำาการเชื่อมที่ใช้อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมและอุณหภูมิระหว่างที่เชื่อมที่เหมาะสม

### สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)

C	Si	Mn	P	S
0.09	0.08	0.60	0.014	0.010

### สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

YP นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	TS นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	EI %	IV จูลย์ (กก.แรง.-ม.)
410 (42)	460 (47)	31	98 (10)

ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟฟ้าที่แนะนำให้ใช้ (AC,DC – EP or DC-EN)

Dia (มม.)		2.6	3.2	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0
L (มม.)		350	350	400	400	400	450	450	450
				450	450	450			550
Amp	F	50~	80~	120~	145~	170~	240~	300~	350~
		85	130	180	200	250	310	370	440
	V & OH	40~	60~	100~	120~	130~	-	-	-
		70	110	150	180	200			

LB – 26

JIS Z3211 D 4316

สำหรับการเชื่อมงานโครงสร้างขนาดใหญ่และแผ่นงานหนา ๆ

AWS A5 , 1 E 7016

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็กงานโครงสร้างขนาดใหญ่ทั่วๆ ไปสำหรับเรือเดินทะเล , ตึกสูง ๆ , สะพานและถึงความดันที่ทำจากเหล็กถมนูน

คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

LB – 26 เป็นอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ชนิดไฮโดรเจนต่ำที่มีผงเหล็กผสมอยู่ในเปลือกฟลักซ์ ดังนั้นประสิทธิภาพในการเชื่อมจึงสามารถปรับปรุงให้สูงขึ้น

เนื้อโลหะรอยเชื่อมจะให้ความสมบูรณ์ในการทะลุผ่านของรังสีเอ็กซ์อย่างมีและมีคุณสมบัติทางกลที่ดีด้วย การเชื่อมในทุกแนวการเชื่อมสามารถทำได้โดยง่ายด้วยความสามารถในการใช้งานที่ดีของการอาร์คที่คงที่ , การกำจัดตะกอนออกได้ง่ายและได้ลักษณะของตะเข็บเชื่อมที่ดี

ข้อควรจำในการใช้งาน

1. ทำการอบแห้งอิเล็กโทรดที่ 300 – 350 °ซ. เป็นเวลา 30-60 นาที ก่อนการใช้งาน
2. ใช้วิธีการเชื่อมถอยหลัง (backstep) หรือเริ่มการอาร์คบนแผ่นเหล็กเล็ก ๆ ที่เตรียมไว้ เพื่อป้องกันการเกิดโพรงก๊าซที่ตำแหน่งเริ่มการอาร์ค
3. รักษาระยะอาร์คให้สั้นเท่าที่จะทำได้

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)

C	Si	Mn	P	S
0.08	0.44	0.97	0.013	0.009

### สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

YP นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	TS นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	EI %	IV จูลย์ (กก.แรง.-ม.)	PWHT
470 (48)	540 (55)	33	220 ( 22)	-
410(42)	500 ( 51)	34	240 ( 24)	620°C x 1 hr.

### ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟฟ้าที่แนะนำให้ใช้ (AC or DC-EP)

Dia (มม.)		2.0	2.6	3.2	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
L (มม.)		300	350	350	400	450	450	450	450
Amp	F	35~	55~	100~	140~	190~	260~	300~	340~
		60	85	140	190	250	320	380	440
	V & OH	30~	50~	90~	120~	160~	-	-	-
		55	80	130	180	210			

LB-52

JIS Z3212 D 5016

สำหรับการเชื่อมเหล็กทนแรงดึงสูง 50 กก.แรง/มม.<sup>2</sup>

AWS A5.1 E7016

TIS 514B26

### การนำไปใช้งาน

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็กกล้าและเหล็กทนแรงดึงสูง 50 กก.แรง/มม.<sup>2</sup> ในเรือเดินทะเล สะพาน , ตึกก่อสร้าง และหม้อต้มความดัน

### คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

LB-52 เป็นอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ชนิดไฮโดรเจนต่ำที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุด สำหรับการเชื่อมในทุกการเชื่อมของเหล็กทนแรงดึงสูง 50 กก.แรง/มม.<sup>2</sup>

ความสมบูรณ์ในการทะลุผ่านของรังสีเอ็กซ์และสมบัติทางกลของเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะดีเยี่ยม ความสามารถในการใช้งาน เช่น การอาร์คที่เรียบ , การกำจัดตะกรันและความสวยงามของตะเข็บเชื่อมก็จะดี

### ข้อควรจำในการใช้งาน

1. ทำการอบแห้งอิเล็กโทรดที่ 300-350°ซ. เป็นเวลา 30-60 นาที ก่อนการใช้งาน
2. ใช้วิธีการเชื่อมกาวลอยหรือเริ่มต้นการอาร์คบนแผ่นเหล็กเล็ก ๆ ที่เตรียมไว้เพื่อการนี้ โดยเฉพาะ เพื่อป้องกันการเกิดโพรงก๊าซที่ตรงเริ่มต้นการอาร์ค

3. รักษาระยะอาร์คให้สั้นเท่าที่จะทำได้
4. ควรกำหนดปริมาณลวดเชื่อมที่จะอบให้เหมาะกับปริมาณของงานในแต่ละวัน

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)

C	Si	Mn	P	S
0.08	0.58	0.96	0.011	0.007

สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

YP นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	TS นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	EI %	IV จูลย์ (กก.แรง.-ม.)	PWHT
490 (50)	560 (57)	32	230 (23)	-
420 (43)	520 (53)	33	270 (28)	620°C x 1 ชม.

ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC or DC-EP)

Dia (มม.)		2.6	3.2	4.0	4.5	5.0	6.0
L (มม.)		350	350	400	400	450	450
Amp	F	55~ 85	90~ 130	130~ 180	150~ 210	180~ 240	250~ 310
	V & OH	50~ 80	80~ 120	110~ 170	140~ 190	150~ 200	-

LB-52U

สำหรับการเชื่อมด้านเดียว

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมด้านเดียวแบบปกคลุมการอาร์คของท่อและรอยต่อชนทั่ว ๆ ไป ของเหล็กแผ่นและเหล็ก  
ทนแรงดึงสูง 50 กก. แรง/มม.<sup>2</sup>

คุณลักษณะพิเศษในการนำไปใช้งาน

LB-52U เป็นอิเล็กโตรดหุ้มฟลักซ์ชนิดไฮโดรเจนต่ำสำหรับใช้งานพิเศษเฉพาะอย่างสำหรับการ  
เชื่อมด้านเดียวของท่อและงานโครงสร้างทั่ว ๆ ไป

JIS Z3211 D4316

AWS A 5.1 E 7016



การอาร์คที่สามารถทำให้คงที่ได้เป็นข้อดีอย่างมากที่สุดในการเชื่อมด้านเดียวด้วยกระแสไฟฟ้า LB-52 U จะให้การกำจัดตะกรันทำได้ง่ายและได้ตะเข็บเชื่อมที่เรียบ

#### ข้อควรจำในการใช้งาน

1. ทำการอบแห้งอิเล็กโทรดที่ 300 – 350°ซ. เป็นเวลา 30-60 นาที ก่อนการใช้งาน
2. ตะเข็บเชื่อมด้านตรงข้ามที่สวองงามจะทำได้เมื่อใช้กระแสไฟที่เหมาะสมและใช้ระยะห่างที่ฐานที่ดีที่สุด
3. บุติการอาร์คหลังจากเติมบ่อปลายตะเข็บเชื่อม (crater) ที่ผนังด้านข้างของร่องเชื่อม เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดรอยแตกร้าวที่บ่อปลายตะเข็บเชื่อม
4. เริ่มการอาร์คบนแผ่นเหล็กเล็ก ๆ ที่เตรียมไว้หรือเริ่มบนผนังด้านข้างของร่องเชื่อม เพื่อป้องกันการเกิดโพรงก๊าซที่มีสาเหตุมาจากการเริ่มอาร์ค
5. รักษาระยะอาร์คให้สั้นเท่าที่จะทำได้

#### สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)

C	Si	Mn	P	S
0.08	0.64	0.86	0.012	0.010

#### สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

YP นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	TS นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	EI %	IV จูลย์ (กก.แรง.-ม.)
460 (47)	550 (56)	31	110 (11)

#### ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC,DC – EP or DC-EN)

Dia (มม.)		2.6	3.2	4.0	5.0
L (มม.)		350	350/400	400	400
Amp	OSW	30~80	60~110	90~140	130~180
	F	60_90	90~130	130~180	180~240
	V & OH	50~80	80~120	110~170	150~200

\* DC-EN ใช้สำหรับชั้นเชื่อมที่ฐานเท่านั้น

LB-52-18

JIS Z3212 D5016

สำหรับการเชื่อมเหล็กทนแรงดึงสูง 50 กก.แรง/มม<sup>2</sup>

AWS A5.1 E7018

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็กตะมุนและเหล็กทนแรงดึงสูง 50 กก.แรง/มม<sup>2</sup> ในเรือเดินทะเล สะพาน , ตึกก่อสร้าง และหม้อความดัน

สมบัติพิเศษในการใช้งาน

LB-52-18 เป็นอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ชนิดผงเหล็กไฮโดรเจนต่ำสำหรับการเชื่อมในทุกแนวการเชื่อม สมบัติทางกลของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเช่นเดียวกันชนิด LB-52

ความสามารถในการใช้โดยกระแสไฟตรงจะดีที่สุดในงานอิล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำ

ข้อควรจำในการใช้งาน

1. ทำการอบแห้งอิเล็กโทรดที่ 300-350°ซ. เป็นเวลา 30-60 นาที ก่อนการใช้งาน
2. ใช้วิธีการเชื่อมถ้าวลอยหรือเริ่มต้นการอาร์คบนแผ่นเหล็กชั้นเหล็กๆ ที่เตรียมไว้เพื่อการนี้โดยเฉพาะเพื่อป้องกันโพรงก๊าซที่ตรงเริ่มการอาร์ค
3. รักษาระยะอาร์คให้สั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)

C	Si	Mn	P	S
0.07	0.59	0.97	0.013	0.008

สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

YP นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	TS นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	EI %	IV จูลย์ (กก.แรง.-ม.)
500 (51)	560 (57)	31	220 (22)

ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (DC-EP or AC )

Dia (มม.)		2.6	3.2	4.0	5.0	5.5	6.0	7.0
L (มม.)		350	400	450	450	450	450	450
Amp	F	65~ 95	90~ 130	130~ 190	190~ 250	220 ~ 280	250~ 320	300~ 380
	V & OH	60~ 90	80~ 120	110~ 170	165~ 210	-	-	-

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับเหล็กอะลูมิเนียม (การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค)

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		การนำไปใช้งานและลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ( มม.)	แอมแปร์ AC,DC-EP OR DC-EN	
	JIS	AWS			F	V & OH
KOBÉ – 6010	-	A5.1 E6010	อิเล็กโทรดชนิดเซลลูโลสสูง สำหรับเหล็กกล้า API x42-52 ใช้ กับกระแสไฟตรงเท่านั้น เหมาะ สำหรับการเชื่อมท่อและโครงสร้าง ทั่ว ๆ ไป ในทุกแนวการเชื่อม รวมทั้งการเชื่อมแนวตั้งลงด้วยได้ การซึมลึกของรอยเชื่อมที่ลึกลง, มี ตะกรันน้อยทำให้การเชื่อมเคลื่อน ไปได้ง่าย, การเกิดรุกรุนก็เกิดยาก และความสมบูรณ์ในการทะลุผ่าน ของรังสีเอ็กซก็ดีขึ้นด้วย	2.4	40-75	40-75
				3.2	70-130	70-130
				4.0	90-180	90-180
				4.8	140-225	140-225

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับเหล็กอะลูมิเนียม (การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค) (ต่อ)

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		การนำไปใช้งานและลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ( มม.)	แอมแปร์ AC,DC-EP OR DC-EN
	JIS	AWS			
			อิเล็กโทรดชนิดควีนพิชน้อย		F & HF

ZERODE-27	Z3211	A.5.1	สำหรับการเชื่อมแนวระดับหรือแนวราบต่อฉากอย่างมีประสิทธิภาพสูงของเหล็กแผ่นที่ใช้สำหรับโครงสร้างเรือเดินทะเล, สะพาน, ตึกก่อสร้าง และโครงสร้างทั่วไปโดยการเชื่อม	4.0	140-180
	D4327	E6027	ใช้แรงการเกิดควันทันพื้นมีประมาณ 50% ของ Autocon -27 รูปแบบของตะเข็บเชื่อมและความต้านทานการเกิดรอยกินลึกจะดีถึงแม้ว่าจะเชื่อมแผ่นชิ้นงานที่มีสังกะสีเคลือบอยู่อัตราส่วนของความยาวตะเข็บเชื่อมต่อความยาวของอิเล็กโทรดที่สั้นเปลืองก็คือ 1.0 ต่อ 1.8	4.5	170-210
				5.0	180-230
				5.5	210-260
				6.0	240-290
				6.4	260-310
				7.0	280-330
				8.0	340-380

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)					สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม			
C	Si	Mn	P	S	YP N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J(kgf-m)
0.10	0.20	0.48	0.009	0.014	420 (43)	480 (49)	27	-29°C 81 (8.3)

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไป ของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)					สมบัติทางกลโดยทั่วไปของ เนื้อโลหะรอยเชื่อม			
C	Si	Mn	P	S	YP N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J(kgf-m)
0.07	0.38	0.72	0.018	0.010	420 (43)	480 (49)	32	84 (8.6)

N/mm<sup>2</sup> = นิวตัน / มม.<sup>2</sup>

kgf/mm<sup>2</sup> = กก.แรง/มม.<sup>2</sup>

J(kgf-m) = จูลย์(กก.แรง.ม.)

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับเหล็กละมุนหรือเหล็กทนแรงดึงสูง 50 กก.แรง/มม.<sup>2</sup>

(การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค)

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		การนำไปใช้งานและลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	แอมแปร์ AC or, DC-EP
	JIS	AWS			
LTB - 50	Z 3212 D 5003	-	สำหรับการใช้งานพิเศษในการเชื่อม		F & HF
			แนวราบและแนวระดับต่อฉากของ		
			เหล็กละมุนและเหล็กทนแรงดึงสูง	3.2	100-130
			50 กก.แรง/มม. <sup>2</sup> สำหรับสะพานและ	4.0	135-195
			ตึกก่อสร้างประกายโลหะจะมีน้อย	4.5	170-220
			และการกำจัดตะกรันด้านทานการ	5.0	200-240
			เกิดรอยกินลึกและความสวยงาม	5.5	230-280
			ของตะเข็บเชื่อมจะทำให้ดีเยี่ยม	6.0	260-310
			นอกจากนี้ยังเหมาะสำหรับการเชื่อม	6.4	280-330
			ใช้แรงโน้มถ่วงและการเชื่อมสัมผัส	7.0	300-350
อัตโนมัติด้วยเช่นกันและการใช้	8.0	350-400			
			กระแสไฟตรงอิเล็กโทรดขั้วลบก็		
			สามารถใช้ได้		

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		การนำไปใช้งาน และ ลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	แอมแปร์ AC or,DC-EP	
	JIS	AWS			F	V & OH
LB-52A	Z 3212 D5016	A5.1 E 7016	ใช้กับเหล็กถลุงและเหล็ก ทนแรงดึงสูง 50 กก.แรง/มม. <sup>2</sup> สำหรับเรือเดินทะเล,สะพาน ตึกก่อสร้างและหม้อความดัน อิเล็กทรอนิกส์นี้เป็นชนิด ไฮโดรเจนต่ำพิเศษที่มีความ ต้านทานการแตกร้าวได้ดี เนื่องจากให้ความสมบูรณ์ใน การทะลุผ่านของรังสีเอ็กซ์ และสมบัติทางกลอย่างดียเยี่ยม จึงเหมาะสำหรับแผ่นชิ้นงาน หนา ๆ นอกจากนี้ยังให้ค่า การกระแทกที่ตีมากกว่า อิเล็กทรอนิกส์ Mn-Si ทั่ว ๆ ไปที่ประมาณ -20°ซ.	2.6		
				3.2	55-85	50-80
				4.0	90-130	80-120
				5.0	130-180	110-170
				6.0	180-240 250-310	150-200 -
LBW-52	Z3214 DA5016G	-	สำหรับการเชื่อมในทุกแนว การเชื่อมของเหล็กถลุงและ เหล็กทนแรงดึงสูง 50 กก. แรง.มม. <sup>2</sup> ที่ทนได้ทุกสภาพ อากาศ(ซึ่งปกติจะทาสีเคลือบ ได้) เปลือกหุ้มฟลักซ์เป็น ชนิด ไฮโดรเจน ต่ำและ ความสามารถในการใช้งาน คล้ายกับ LB-52 และเหมาะ สำหรับการเชื่อมแผ่นชิ้นงาน หนา ๆ	2.6	F	V & OH
				3.2	50-85	45-80
				4.0	80-130	80-115
				5.0	130-180	110-170
				6.0	180-240 250-310	150-210 -

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะ รอยเชื่อม (%)					สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม			
C	Si	Mn	P	S	YP N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J(kgf-m)
0.07	0.38	0.99	0.017	0.012	480 (49)	530 (54)	31	88 (9.0)
0.08	0.56	1.16	0.012	0.006	500 (51)	580 (59)	32	250 (25)
0.08	0.45	0.80	0.013	0.007 Cu : 0.23 Ni : 0.36	490 (50)	550 (56)	31	200 (20)

LB-62

JIS Z3212 D5816

AWS A5.5 E9016-G

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ป้องกันความชื้นสำหรับเหล็กทนแรงดึงสูง 60 กก.แรง/มม<sup>2</sup>

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็กทนแรงดึงสูง 60 กก.แรง/มม<sup>2</sup> สำหรับหม้อความดัน, หัวชุดเจาะ, สะพาน, โครงสร้างแท่นชุดเจาะในทะเล, ยานยนต์และเครื่องจักรกล

คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

LB-62 เป็นอิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำพิเศษสำหรับการเชื่อมในทุกแนวการเชื่อม ซึ่งทำให้ได้สมบัติทางกลที่ดี สำหรับเนื้อโลหะรอยเชื่อมและเปลือกหุ้มฟลักซ์ป้องกันความชื้นได้ด้วยความสมบูรณ์ในการทะลุผ่านของรังสีเอ็กซ์ของเนื้อโลหะรอยเชื่อมและความสามารถในการใช้งานจะดีในการเชื่อมทุกแนวการเชื่อม เพราะว่าปริมาณไฮโดรเจนของเนื้อโลหะรอยเชื่อมมีน้อยมากดังนั้นจึงมีความต้านทานการแตกร้าวได้ดี

ข้อควรจำในการใช้งาน

1. ทำการอบแห้งอิเล็กโทรดที่ 350-400 °ซ. เป็นเวลา 1 ชม. ก่อนการใช้งาน
2. ใช้วิธีการเชื่อมก๊าวถอยหรือเริ่มต้นการอาร์คบนแผ่นเหล็กเล็ก ๆ ที่เตรียมไว้เพราะการเริ่มต้นการอาร์คบนแผ่นชิ้นงานอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกร้าวขึ้นได้
3. อุณหภูมิงานก่อนเชื่อมที่ 50-100°ซ. โดยขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กและความหนาของแผ่นชิ้นงาน
4. ควบคุมกระแสไฟและความเร็วในการเชื่อมอย่างระมัดระวังเพราะว่ากระแสไฟที่สูงเกินไปและความเร็วที่ช้าทำให้ได้เนื้อโลหะรอยเชื่อมที่หนาขึ้นและเป็นที่เหตุให้ได้ค่าต่ำลงของค่าการกระแทก และความแข็งแรง 0.2% ออฟเซตของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
0.07	0.52	1.16	0.010	0.006	0.63	0.26

สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

0.2% OS	TS	EI	IV
นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	%	จูลย์ (กก.แรง-ม.)-20 C.
540 (55)	650 (66)	30	150 (15)



ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC or DC-EP )

Dia ( มม.)		2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
L ( มม.)		300	350	400	400	450
Amp	F	55~85	90~130	130~180	180~240	250~310
	V & OH	50~80	80~115	110~170	150~200	-

LB -116

JIS Z3212 D8016

AWS A5.5 E11016-G

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ป้องกันความชื้นสำหรับเหล็กทนแรงดึงสูง 80 กก.แรง/มม<sup>2</sup>

ข้อควรจำในการใช้งาน

1. ทำการอบแห้งอิเล็กโทรดที่ 350-400 °ซ. เป็นเวลาประมาณ 1 ชม. ก่อนการใช้งาน เก็บรักษาอิเล็กโทรดที่อุณหภูมิ 100-150 °ซ. หลังจากการอบแห้งเพื่อป้องกันอิเล็กโทรดไม่ให้ถูกความชื้น
2. ใช้วิธีการเชื่อมก้ำวถอยหรือเริ่มต้นการอาร์คบนแผ่นเหล็กเล็ก ๆ ที่เตรียมไว้ เพราะว่าการเริ่มอาร์คบนแผ่นชิ้นงานอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกร้าว
3. อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมที่ 120-180 °ซ. โดยขึ้นกับชนิดของเหล็กและความหนาของแผ่นชิ้นงาน
4. ควบคุมกระแสไฟและความเร็วในการเชื่อมอย่างระมัดระวัง เพราะว่าการกระแสไฟที่สูงเกินไปและความเร็วที่ช้าทำให้ได้เนื้อโลหะรอยเชื่อมที่หนาขึ้น และเป็นเหตุให้ได้ค่าที่ต่ำลงของค่าการกระแทกและความแข็ง 0.2% ออฟเซตของเนื้อโลหะรอยเชื่อม
5. ให้ความร้อนหลังการเชื่อมโดยทันทีที่ 150-200 °ซ. ซึ่งจะป้องกันการแตกร้าวได้อย่างได้ผล

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็กทนแรงดึงสูง 80 กก.แรง/มม<sup>2</sup> สำหรับหม้อความดัน, หัวชุดเจาะ , สะพาน โครงสร้างแท่นชุดเจาะในทะเล เครื่องจักรกลในอุตสาหกรรมและงานโครงสร้าง

คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

LB-116 เป็นอิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำพิเศษสำหรับการเชื่อมในทุกแนวการเชื่อม อิเล็กโทรดชนิดนี้ให้ความสมบูรณ์ในการทะลุผ่านของรังสีเอ็กซ์และสมบัติทางกลที่ดีขึ้น มีความสามารถต้านทานการแตกร้าวได้ดีเยี่ยมเป็นพิเศษ มีอัตราส่วนการดูดซับความชื้นที่ต่ำมากเพราะว่าเปลือกฟลักซ์เป็นชนิดป้องกันความชื้น

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.08	0.63	1.50	0.010	0.006	1.83	0.28	0.43

สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

0.2% OS	TS	EI	IV
นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	%	จูลย์ (กก.แรง.-ม.)-20 °C.
730 (74)	830 (85)	24	110 (11)

ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC or DC-EP )

Dia (มม.)		2.6	3.2	4.0	5.0
L (มม.)		300	350	400	400
Amp	F	55~85	90~130	130~180	180~240
	V & OH	50~80	80~115	110~170	-

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับเหล็กทนแรงดึงสูง 70 กก.แรง/มม<sup>2</sup>

(การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค)

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		การนำไปใช้งาน และลักษณะเด่น	เส้น ผ่านศูนย์กลาง (มม.)	แอมแปร์	
	JIS	AWS			AC or, DC-EP	
LB-106	Z3212 D7016	A 5.5 E10016-G	อิเล็กโทรดป้องกันความชื้น สำหรับเหล็กทนแรงดึงสูง สำหรับหม้อความดัน, หัวชุด	3.2	F	V & OH
			เจาะ, สะพาน, โครงสร้างแทน	4.0	90-130	80-115
			ชุดเจาะในทะเล และ	5.0	130-180	110-170
			เครื่องจักรกลในอุตสาหกรรม	6.0	180-240	150-200
			ความสมบูรณ์ในการทะลุผ่าน ของรังสีเอ็กซ์ ค่าการกระแทก และการต้านทานการแตกร้าว ของเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่ได้ จะดีเยี่ยม		250-320	-

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับเหล็กทนแรงดึงสูง 70 กก.แรง/มม<sup>2</sup> (ต่อ)

(การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค)

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		การนำไปใช้งานและลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	แอมแปร์ AC or,DC-EP
	JIS	AWS			
LB-52T	Z3212	A 5.1 E	สำหรับการเชื่อมแต้ม (tack welding) ของเหล็กถนและ เหล็กทนแรงดึงสูง 50 กก.แรง/ มม <sup>2</sup> สำหรับเรือเดินทะเล ตึก ก่อสร้างและสะพาน เป็น อิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำและ ง่ายต่อการอาร์คเข้า ทำให้การ ปฏิบัติการเชื่อมแต้มทำได้ดียิ่ง เมื่อใช้กระแสไฟที่เหมาะสมก็ สามารถทำการเชื่อมได้ทุกแนว การเชื่อมรวมทั้งการเชื่อมใน แนวตั้งลง	3.2	AP
	D5016	7048		4.0	110-160
				5.0	160-220 220-260

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไป ของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)						สมบัติทางกลโดยทั่วไป ของเนื้อโลหะรอยเชื่อม			
C	Si	Mn	P	S	อื่น ๆ	0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J(kgf-m)
0.08	0.61	1.40	0.010	0.005	Ni : 1.50 Cr : 0.22 Mo : 0.19	660 (67)	760 (78)	25	-20°C 110 (11)

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไป ของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)						สมบัติทางกลโดยทั่วไป ของเนื้อโลหะรอยเชื่อม			
C	Si	Mn	P	S	อื่นๆ	0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J(kgf-m)
0.08	0.49	0.96	0.012	0.008		450 (46)	540 (55)	32	180 (18)

LB-52NS

JIS Z3212 D5016

AWS A5.5 E7016-G

สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้ากำลังอัดดุนนุ่มสำหรับการใช้งานอุณหภูมิต่ำ  
การนำไปใช้งาน

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คสำหรับถังใส่ก๊าซแอลพีจี , ถังเก็บรักษาก๊าซแอลพีจี, อุปกรณ์ที่ใช้  
ในอุณหภูมิต่ำ และ โครงสร้างแท่นขุดเจาะในทะเลที่ถูกใช้ในบริเวณมีอุณหภูมิต่ำ

คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

LB-52NS เป็นอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ชนิดไฮโดรเจนต่ำพิเศษสำหรับการเชื่อมในทุกแนวการเชื่อม  
สำหรับเหล็กกล้ากำลังอัดดุนนุ่มที่ใช้ในอุณหภูมิต่ำและทำให้มีความสามารถในการใช้งานที่ดี เนื้อ  
โลหะรอยเชื่อมจะเป็นชนิด 5% Ni-Ti-B และมีสมบัติทาง CTOD ที่ดีเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงถึง -  
30 °ซ. และมีค่าการกระแทกที่ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำลงถึง -60 °ซ.

หมายเหตุ : -CTOD (Crack tip opening displacement) = การแตกร้าวที่เปิดออกส่วนปลาย

ข้อควรจำในการใช้งาน

1. ความร้อนเข้าต้องถูกควบคุมเพื่อที่จะได้ค่าการกระแทกตามต้องการเนื่องจากความ  
เหนียวบาก (notch toughness) จะลดลงเมื่อความร้อนเข้าสูงขึ้น
2. อุณหภูมิงานก่อนเชื่อมที่อุณหภูมิ 50-100 °ซ. โดยขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กและความหนา  
ของชิ้นงาน

3. ทำการอบแห้งอิเล็กโทรดที่ 350 – 400 °ซ. โดยขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กและความหนาของชิ้นงาน
4. ใช้วิธีการเชื่อมก๊าวถอยหรือเริ่มต้นการเชื่อมบนแผ่นเหล็กเล็ก ๆ เพื่อป้องกันการเกิดโพรงก๊าซที่ตรงจุดเริ่มต้นการอาร์คในร่องเชื่อม

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Ti	B
0.08	0.40	1.38	0.012	0.007	0.48	0.023	0.0021

สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

0.2% OS นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	TS นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	EI %	IV จูลย์ (กก.แรง.-ม.)-60°C	PWHT
490 (50)	580 (59)	29	130 (13)	-
470 (48)	570 (58)	31	120 (12)	620°C x 1 hr.

ค่า CTOD ของเนื้อโลหะรอยเชื่อม				PWHT
ชนิด	ความหนา	ความร้อน เข้า	CTOD (มม.)	
BS4360 – 50 D	63 mm ร่อง - X	40 KJ / cm	1.38	-
			1.39	600°C x 5 hr.

ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC or DC-EP )

Dia (มม.)		3.2	4.0	5.0	6.0
L (มม.)		350	400	450	450
Amp	F	90~130	130~180	180~240	250~310
	V & OH	80~120	110~170	150~200	-

KJ/cm = กิโลจูลย์ / ซม.

NB-1

JIS Z3241 DL5016-C-1

AWS E8016-G

สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าก้ำจัดอุณหภูมิสำหรับอุณหภูมิต่ำ

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมเหล็กกล้าก้ำจัดอุณหภูมิสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ สำหรับถังบรรจุก๊าซแอลพีจี และถังเก็บก๊าซแอลพีจี

คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

NB-1 เป็นอิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำพิเศษในการเชื่อมทุกแนวการเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าก้ำจัดอุณหภูมิที่ถูกใช้งานในที่อุณหภูมิต่ำ

เนื้อโลหะรอยเชื่อมจะมีธาตุนิกเกิลประมาณ 1.5%

ความเหนียวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่อุณหภูมิ (-40 ถึง -50°C) จะดีและคงที่

ข้อควรจำในการใช้งาน

1. ต้องจำไว้ว่าไม่ให้ใช้ความร้อนเข้าเกินปริมาณที่เหมาะสม เพราะจะทำให้ค่าการกระแทกของเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะลดลง
2. ทำการอบแห้งอิเล็กโทรดที่ 350 – 400 °ซ. เป็นเวลาประมาณ 1 ชม. ก่อนการใช้งาน
3. ใช้วิธีการเชื่อมก้ำวอลอยและเริ่มต้นการเชื่อมบนแผ่นเหล็กเล็ก ๆ ที่เตรียมไว้ โดยเฉพาะเพื่อป้องกันการเกิดโพรงก๊าซตรงที่เริ่มการอาร์ค
4. รักษาระยะอาร์คให้สั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Ni
0.06	0.58	1.12	0.010	0.006	1.60

สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

YP นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	TS นิวตัน/มม <sup>2</sup> (กก.แรง/มม <sup>2</sup> )	EL %	IV (kgf-m) - 50 °C	PWHT
530 (54)	620 (63)	30	130 (13)	As welded
500 ( 51)	600 (61)	31	140 (41)	620 C x 1hr.SR

ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC or DC-EP )

Dia ( มม.)		2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
L ( มม.)		300	350	400	400	450
Amp	F	55~85	90~130	130~180	180~240	250~310
	V & O	50~80	80~120	110~170	150~200	-

J(kgf-m) = จูลย์ (กก.แรง.ม.)

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับเหล็กที่ใช้งานในอุณหภูมิต่ำ (การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค)

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		การนำไปใช้งานและลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ( มม.)
	JIS	AWS		
NB-2	Z3241	A5.5	อิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำพิเศษสำหรับการเชื่อมในทุกแนวการเชื่อมของเหล็กกล้า กำจัดอูมิเนียมหรือ 2.5% Ni สำหรับการใช งานที่อุณหภูมิต่ำ เนื้อโลหะรอยเชื่อมจะมี Ni ประมาณ 2.5% และจะให้ค่ากระแทกที่ดีที่ อุณหภูมิลดลงถึง -60 °ซ.	2.6
	DL5016	E8016		3.2
	-C-2	-C1		4.0
				5.0
NB-3N	Z3241	A 5.5	อิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำพิเศษสำหรับการเชื่อมในทุกแนวการเชื่อมของเหล็กกล้า 3.5% Ni สำหรับงานที่เกี่ยวข้องกับเอทิลีน (ethylene) เนื้อโลหะรอยเชื่อมจะมีนิเกิลผสม อยู่เกือบเท่าในอิเล็กโทรดและมีค่าทนแรงดึง เกือบเท่าโลหะชิ้นงานซึ่งทำให้มีสมบัติการ เชื่อมต่อกันที่สมบูรณ์ให้การให้ความร้อนหลัง การเชื่อม (PWHT) ที่อุณหภูมิ 600 ถึง 620°ซ. จะให้ค่าการกระแทกที่ดีเยี่ยมที่อุณหภูมิ ลดลงถึง -100 °ซ.	2.6
	DL5016	E7016		3.2
	-D-3	-G		4.0
				5.0

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)							สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม				PWHT
C	Si	Mn	P	S	Ni	อื่นๆ	0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	Ei %	IV J(kgf-m)	
0.06	0.45	0.89	0.010	0.006	2.41	-	500 (51)	610 (62)	30	-60°C 120 (12)	-
							480 (49)	580 (59)	32	-60°C 130 (13)	620°C x 1 hr
0.03	0.33	0.94	0.010	0.009	3.20	Mo: 0.27	460 (47)	550 (56)	32	-100°C 100 (10) -85°C 120 (12)	620°C x 1 hr

N/mm<sup>2</sup> = นิวตัน/มม<sup>2</sup>kgf/mm<sup>2</sup> = กก.แรง/มม<sup>2</sup>

J(kgf-m) = จูลย์ (กก.แรง-ม.)

CMA -76

JIS Z3223 DT1216

AWS A5.5 E7016-A1

สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้า 0.5% Mo

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็กกล้า 0.5% Mo ที่ใช้ในอุณหภูมิสูงและหม้อไอน้ำแรงดันสูง, โรงงานสารเคมี และโรงกลั่นน้ำมัน

คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

CMA-76 เป็นอิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำสำหรับการเชื่อมในทุกแนวการเชื่อมซึ่งทำให้ได้เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีส่วนผสมของ 0.5% Mo



### ข้อควรจำในการนำไปใช้

1. อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมและอุณหภูมิระหว่างเทียบเชื่อมคือ 100 ถึง 200 °ซ.
2. อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานหลังเชื่อมคือ 620 ถึง 680 °ซ.

### สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Mo
0.06	0.49	0.79	0.009	0.004	0.54

### สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

TT (°C)	0.2% OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J (kgf-m)	PWHT
RT	550 (56)	29	210 (21)	620 C x 1 hr
450	410 (42)	22	-	

### ความแข็งแรงครีพรีฟเจอร์

500°C x 1000 hr	PWHT
360 N/mm <sup>2</sup> (37 kgf/mm <sup>2</sup> )	620°C x 1 hr

### ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC or DC-EP )

Dia (มม.)		2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
L (มม.)		300	350	400	400	400
Amp	F	55~85	90~130	140~190	190~240	240~300
	V & OH	50~80	80~120	110~170	-	-

CMA – 96

JIS Z3223 DT2316

AWS A5.5 E8016-B2

สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้า 1.25% Cr-0.5% Mo

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็ก ASTM A387-Gr11 ที่ใช้สำหรับโรงงานพลังถ่านหิน, โรงงานปิโตรเคมี และโรงกลั่นน้ำมัน

คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

CMA-96 เป็นอิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำสำหรับการเชื่อมในทุกแนวการเชื่อม ซึ่งจะทำให้ได้เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีส่วนผสมของ 1.25% Cr-0.5% Mo

CMA –96 ธาตุเจือจะมาจากแกนลวดเชื่อม

ข้อควรระวังในการใช้งาน

1. อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมและอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมคือ 150 ถึง 300 °ซ.
2. อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานหลังเชื่อมคือ 650 ถึง 700 °ซ.

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.07	0.43	0.81	0.008	0.004	1.31	0.54

สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

TT (°C)	0.2% OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J (kgf-m)	PWHT
RT	570 (58)	650 (66)	26	210 (21)	690°C x 1 hr SR.
450	460 (47)	520 (53)	21	-	

ความแข็งแรงครีฟไฟเบอร์

500 C x 1000 hr	PWHT
180 N/mm <sup>2</sup> (37 kgf/mm <sup>2</sup> )	690 °C x 8 hr

ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC or DC-EP )

Dia (มม.)		2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
L (มม.)		300	350	400	400	400
Amp	F	50~90	80~120	125~175	185~235	240~300
	V & OH	50~80	75~110	100~160	-	-

CMA -106

JIS Z3223 DT2416

AWS A5.5 E9016-B3

สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้า 2.25% Cr-1 % Mo

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็ก ASTM A387 Gr22 ที่ใช้สำหรับโรงงานพลังถ่านหิน, โรงงานปิโตรเคมีและโรงกลั่นน้ำมัน ,และโรงงานพลังงานปรมาณู

คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

CMA-106 เป็นอิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำสำหรับการเชื่อมในทุกแนวการเชื่อม ซึ่งจะทำให้ได้เนื้อโลหะรอยเชื่อมของ 2.25% Cr-1% Mo

CMA-106 : ธาตุเจือจะได้จากแกนลวดเชื่อม

ข้อควรจำในการใช้งาน

1. อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมและอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมคือ 200 ถึง 350 °ซ.
2. อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานหลังเชื่อม คือ 680 ถึง 780 °ซ.

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.70	0.40	0.70	0.006	0.004	2.30	1.02

### สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

TT (°C)	0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J (kgf-m)			PWHT
				TT °C	SR	SR+SC	
RT	630 (64)	730 (74)	22	0	120 (12)	-	690 °C x 1 hr
450	520 (53)	580 (59)	17	-	-	-	SR

### ความแข็งแรงครีฟไฟเจอร์

500 C x 1000 hr	PWHT
180 N/mm <sup>2</sup> (19 kgf/mm <sup>2</sup> )	720 °C x 1 hr

### ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC or DC-EP )

Dia (มม.)		2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
L (มม.)		300	350	400	400	400
Amp	F	55~85	90~130	140~190	190~240	240~300
	V & OH	50~80	75~115	100~160	-	-

CM - 5

JIS Z3223 DT2516

AWS A5.4 E502-16

### สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้า 5% CR-0.5% Mo

#### การนำไปใช้งาน

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็ก ASTM A387 Gr5 สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน โรงงานอุตสาหกรรมเคมี และโรงงานไฟฟ้า

#### สมบัติพิเศษในการใช้งาน

CM-5 เป็นอิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำสำหรับการเชื่อมในทุกแนวเชื่อม ซึ่งทำให้ได้เนื้อโลหะรอยเชื่อมของ 5% CR-0.5% Mo

#### ข้อควรจำในการใช้งาน

1. อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อม และอุณหภูมิระหว่างเทียวนเชื่อมคือ 250 – 350 °ซ.
2. อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานหลังเชื่อมคือ 710-760 °ซ.

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.06	0.43	0.62	0.011	0.006	5.11	0.53

สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

TT (°C)	0.2% OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J (kgf-m)	PWHT
RT	400 (41)	560 (57)	33	150 (15)	750°C x 8 hr SR
500	190 (19)	340 (35)	21	-	750°C x 1 hr SR

ความแข็งแรงที่อุณหภูมิ (750°C x 1 hr SR 1000 hr . Rupture Strength)

550 °C
130 N/mm <sup>2</sup> (13.0 kgf/mm <sup>2</sup> )

ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC or DC-EP )

Dia (มม.)		2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
L (มม.)		300	350	400	400	400
Amp	F	50~80	75~115	120~160	160~220	220~280
	V & OH	50~75	75~110	90~150	-	-

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับเหล็กกล้าเจือต่ำทนความร้อน (การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค)

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		การนำไปใช้งานและลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)
	JIS	AWS		
BL-76	Z3212	A5.1	สามารถใช้ได้กับเหล็ก SB49 และเหล็ก คาร์บอนที่มีค่าทนแรงดึงในระดับที่ เท่ากับเหล็ก SB49 ที่ใช้สำหรับหม้อไอน้ำ และหม้อความดัน BL-76 เป็น อิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำพิเศษ สำหรับการเชื่อมในทุกแนวการเชื่อมซึ่งมี เนื้อโลหะรอยเชื่อมจะมี 0.15% Mo และ รักษาความแข็งแรงไว้ที่ 49 กก.แรง/มม. <sup>2</sup> . และสูงกว่าถึงแม้ว่าจะผ่านการอบด้วย ความร้อนหลังเชื่อมเป็นเวลานานหลาย ชั่วโมงก็ตาม	2.6
	D5016	E7016		3.2
				4.0
				5.0
				6.0
BL-96	-	A5.5 E9016 -G	สามารถใช้ได้กับเหล็กกล้า Mn-Mo และ เหล็กกล้า Mn-Mo-Ni เช่น เหล็ก ASTM A302B, A533B Cl. 1 A508 Cl3 ที่ใช้ สำหรับหม้อความดันของโรงงาน พลังงานปรมาณู BL-96 เป็นอิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำ สำหรับการเชื่อมในทุกแนวการเชื่อมซึ่ง เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีสมบัติทางกลที่ดี ยิ่งขึ้นถึงแม้ว่าผ่านการ PWHT มาหลาย ชั่วโมงก็ตาม	3.2
				4.0
				5.0
				6.0
BL -70	Z3212	-	สามารถนำไปใช้กับเหล็ก SB49 และ เหล็กกล้า 0.5% Mo ที่ใช้สำหรับอุณหภูมิ สูง และหม้อไอน้ำแรงดันสูง BL-70 เป็นอิเล็กโทรดชนิดอิลเมไนท์ สำหรับการเชื่อมในทุกแนวการเชื่อมซึ่ง เนื้อโลหะรอยเชื่อมมี Mo= 0.5%	3.2
	D5001			4.0

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับเหล็กกล้าเจือต่ำทนความร้อน (การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค) (ต่อ)

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		การนำไปใช้งานและลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)
	JIS	AWS		
BL-106	-	A5.5 E10016-G	สามารถนำไปใช้กับเหล็กกล้า Mn-Mo-Ni เช่นเหล็ก ASTM A5338 Cl.2 ที่ใช้สำหรับ หม้อความดันของโรงงานพลังงานปรมาณู BL-106 เป็นอิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำ สำหรับการเชื่อมในทุกแนวการเชื่อมซึ่งเนื้อ โลหะรอยเชื่อมมีสมบัติทางกลที่ดีเยี่ยม หลังจากการผ่านการ PWHT มานานหลาย ชั่วโมง	3.2 4.0 5.0

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไป ของเนื้อโลหะรอยเชื่อม							สมบัติทางกลโดยทั่วไป ของเนื้อโลหะรอยเชื่อม				
C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J(kgf- m)	PWHT
0.08	0.60	0.98	0.010	0.007	-	0.14	500 (51)	600 (61)	31	200 (20)	-
							450 (46)	540 (55)	33	230 (23)	620°C x 1 hr
0.07	0.54	1.25	0.008	0.004	0.39	0.53	620 (63)	700 (71)	26	150 (15)	620°C x 1 hr
							540 (55)	620 (63)	28	160 (16)	635 °C x 26 hr
0.10	0.10	0.52	0.013	0.007	-	0.49	470 (48)	540 (55)	31	88 (9.0)	620 °C x 1 hr

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม							สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม				
C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J(kgf-m)	PWHT
0.11	0.36	1.46	0.009	0.005	0.79	0.54	670 (68)	770 (78)	28	110 (11)	595 °C x 3 hr
							570 (58)	670 (68)	2 8	120 (12)	635 °C x 26 hr

NC-38

JIS Z3221 D308-16

AWS A5.4 E308-16

**การนำไปใช้งาน**

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็กกล้าไร้สนิม 18% Cr-8% Ni เช่น SUS 304

**คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน**

NC-38 เป็นอิเล็กโทรดชนิดโลหะไทเทเนียม เนื่องจากอิเล็กโทรดนี้เติมลงไปเนื้อโลหะรอยเชื่อม ออสเทนไนต์ ซึ่งมีปริมาณที่เหมาะสมของเฟอร์ไรต์ ดังนั้นความสามารถในการเชื่อมจึงมีลักษณะพิเศษดีเยี่ยมด้วยความสามารถในการต้านการแตกร้าวที่ดีขึ้น นอกจากนี้ความสามารถในการต้านทานความร้อน , การต้านทานการสึกกร่อนและสมบัติทางกลก็จะดีในสภาวะที่ผ่านการเชื่อมมาแล้ว (as-welded)

**ข้อควรจำในการใช้งาน**

อ้างอิงหน้า 276

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.06	0.28	1.66	0.022	0.004	9.78	20.21



## สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

As welded				ทำการอบชุบ (1050 °C x 30 min W.Q)		
0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J(kgf-m)	0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %
390 (40)	570 (58)	50	74 (7.5)	260 (26)	530 (54)	57

## ความทนทานการกัดกร่อนโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

การทดสอบอวิย (ทดสอบกรดไนตริก 65%)	
PWHT	อัตราการกัดกร่อน (ipn)
-	0.00056
650°C x 2 hr.Ac	0.00095
1050°C x 30 min W.Q.	0.00044

## ขนาดต่าง ๆ

Dia (mm)	2.0	2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
L (mm)	250	300	350	350	350	350

NC -38L

JIS Z3221 D308L-16

AWS A5.4 E308L-16

## การนำไปใช้งาน

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็กกล้าไร้สนิมคาร์บอนต่ำ 18% Cr8% Ni เช่น SUS 304L

## คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

NC-38L เป็นอิเล็กโทรดชนิดโลหะไททาเนียม

เนื่องจากเนื้อโลหะรอยเชื่อมให้โครงสร้างอสเทนไนติกคาร์บอนต่ำซึ่งมีปริมาณเฟอร์ไรท์ที่เหมาะสมดังนั้นความสามารถในการต้านการแตกร้าวก็จะดี และความต้านทานการกัดกร่อนตามขอบเกรนก็จะเป็นข้อดีมากกว่า NC-38

ในสภาวะที่ผ่านการเชื่อมมาเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีและมีสมบัติทางกลที่ดีด้วย

### ข้อควรจำในการใช้งาน

อ้างอิงหน้าที่ 276

### สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.034	0.26	1.36	0.022	0.003	10.03	20.11

### สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

As welded				ทำการอบชุบ (1050 °C x 30 min W.Q)		
0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J(kgf-m)	0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %
390 (40)	560 (57)	48	78 (8.0)	260 (26)	480 (49)	53

### ความทนทานการกัดกร่อนโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

การทดสอบอวิย (ทดสอบกรดไนตริก 65%)		การทดสอบสเตร๊าส์ (ทดสอบกรดซัลฟัด-ซัลฟูริก)
PWHT	อัตราการกัดกร่อน (ipn)	
-	0.00052	
650 °C x 2 hr.Ac	0.00069	
1050 °C x 30 min W.Q.	0.00047	ไม่มีผล

### ขนาดต่าง ๆ

Dia (mm)	1.6	2.0	2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
L (mm)	250	250	300	350	350	350	350

NC - 39

JIS Z3221 D309-16

AWS A5.4 E309-16

### การนำไปใช้งาน

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็กกล้า 22% Cr-12 %Ni เช่น SUS 309S

การเชื่อมโลหะที่ไม่เหมือนกันเช่นการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอนหรือเหล็กกล้า

เชื่อมได้

### คุณสมบัติพิเศษในการใช้งาน

NC-39 เป็นอิเล็กโทรดชนิดโลหะไททาเนียม

เนื่องจากเนื้อโลหะรอยเชื่อมมีปริมาณของเฟอร์ไรท์มากอยู่ในโครงสร้างอสเทนไนติก ดังนั้นจึงมีความสามารถในการเชื่อมดี และยังสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี อีกทั้งต้านทานความร้อนได้อย่างดีในสภาวะผ่านการเชื่อมแล้ว เมื่อเนื้อโลหะรอยเชื่อมมีปริมาณของธาตุเจือเป็นจำนวนมาก และมีโครงสร้างอสเทนไนติกที่คงตัว ดังนั้นอิเล็กโทรดนี้จึงเหมาะสมกับส่วนที่มีการเจือจาง (dilution) โดยโลหะชิ้นงานของเหล็กคาร์บอนหรือเหล็กกล้าเจือต่ำที่นำมาพิจารณาด้วย

### ข้อควรจำในการใช้งาน

อ้างอิงหน้าที่ 276

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.08	0.45	1.61	0.021	0.003	12.51	23.87

สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

As welded				ทำการอบชุบ (1050 C x 30 min W.Q)		
0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J(kgf-m)	0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %
410 (42)	580 (59)	36	62 (6.3)	310 (32)	530 (54)	47

ความทนทานการกัดกร่อนโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

การทดสอบอวิรี่ (ทดสอบกรดไนตริก 65%)	
PWHT	อัตราการกัดกร่อน (ipn)
-	0.00037
650 °C x 2 hr.Ac	0.00046
1050 °C x 30 min W.Q.	0.00034

ขนาดต่าง ๆ

Dia (mm)	2.0	2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
L (mm)	250	300	350	350	350	350

NC -39 L

JIS Z3221 D309L-16

AWS A5.4 E309L -16

**การนำไปใช้งาน**

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของโลหะที่ต่างชนิดกันเช่นการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กคาร์บอนหรือเหล็กคาร์บอนต่ำ การเชื่อมชั้นเหล็กด้านล่างของร่องเชื่อมด้านข้างที่ถูกเคลือบของเหล็กเคลือบ SUS304L หรือการเชื่อมพอก 308L บนเหล็กคาร์บอนหรือเหล็กกล้าเจือต่ำ

**คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน**

NC-39L เป็นอิเล็กโทรดชนิดโลหะไททาเนียม

เนื่องจากเนื้อโลหะรอยเชื่อมมีปริมาณเฟอร์ไรต์มากอยู่ในโครงสร้างอสเทนไนติก ดังนั้นจึงมีความสามารถในการเชื่อมดีและจะให้ความต้านทานการกัดกร่อนและทนทานความร้อนได้อย่างดี ในสถานะที่ผ่านการเชื่อมมาแล้ว อิเล็กโทรดนี้เหมาะสำหรับส่วนที่การเจือจางโดยโลหะชิ้นงานของเหล็กคาร์บอนหรือเหล็กกล้าเจือต่ำที่นำมาพิจารณาด้วย

**ข้อควรจำในการใช้งาน**

อ้างถึงหน้าที่ 276

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.030	0.41	1.40	0.023	0.002	12.76	22.90

สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %
420 (43)	570 (58)	42

ขนาดต่าง ๆ

Dia (mm)	2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
L (mm)	300	350	350	350	350

NC-36

JIS Z3221 D316-16

AWS A5.4 E316-16

**การนำไปใช้งาน**

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็กกล้าไร้สนิม 18% Cr-12 Ni-2% Mo เช่น SUS316

**คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน**

NC-36 เป็นอิเล็กโทรดชนิดโลหะไททาเนียม

เนื่องจากเนื้อโลหะรอยเชื่อมมีปริมาณที่เหมาะสมของเฟอร์ไรต์อยู่ในโครงสร้างอสเทนไนต์ ดังนั้นความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวจึงดีเยี่ยม

ความทนทานการกัดกร่อนโดยเฉพาะกับกรดซัลฟูริกเจือจางจะดีเยี่ยม

สมบัติทางกลของเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่อุณหภูมิสูงจะดีกว่าชนิด NC-38 ความสามารถในการทนทานความร้อนและการกัดกร่อนของเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะดีเยี่ยมในสภาวะผ่านการเชื่อมมาแล้ว

**ข้อควรจำในการใช้งาน**

อ้างอิงหน้าที่ 276

**สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %**

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.05	0.25	1.40	0.022	0.004	12.71	18.91	2.20

**สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม**

As welded				ทำการอบชุบ (1050 C x 30 min W.Q)		
0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J(kgf-m)	0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %
410 (42)	570 (58)	48	80 (8.2)	300 (31)	520 (53)	49

**ขนาดต่าง ๆ**

Dia (mm)	2.0	2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
L (mm)	250	300	350	350	350	350

NC-36 L

JIS Z3221 D316L-16

AWS A5.4 E316L-16

## การนำไปใช้งาน

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็กกล้าไร้สนิม 18% Cr-12 Ni-2% Mo เช่น SUS316L

## คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

NC-36L เป็นอิเล็กโทรดชนิดโลหะไททาเนียม

เนื่องจากเนื้อโลหะรอยเชื่อมมีปริมาณที่เหมาะสมของเฟอร์ไรต์อยู่ในโครงสร้างออสเทนไนต์ ดังนั้นความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวจึงดีเยี่ยม ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนตามขอบเกรนก็จะดีกว่าชนิด NC-36 เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนที่ต่ำกว่า

## ข้อควรจำในการใช้งาน

อ้างถึงหน้าที่ 276

## สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.025	0.44	1.61	0.021	0.003	12.71	18.81	2.21

## สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

As welded				ทำการอบชุบ (1050 C x 30 min W.Q)		
0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J(kgf-m)	0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %
410 (42)	560 (57)	46	83 (3.5)	280 (29)	510 (52)	46

## ขนาดต่าง ๆ

Dia (mm)	1.6	2.0	2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
L (mm)	250	250	300	350	350	350	350

CR-40

JIS Z3221 D410-16

AWS A5.4 E410-16

CR-40 Cb

JIS Z3221 D410Nb-16

AWS A5.4 (E410-16)

## การนำไปใช้งาน

CR-40 การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS403, SUS410, SUS420J1 และ SUS420J2 และการเชื่อมพอกผิวแข็งสำหรับการใช้งานที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีการกัดกร่อน

CR-40Cb : การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS403, SUS405, และ SUS410 และการเชื่อมของเหล็กกล้าเคลือบ SUS405

## สมบัติพิเศษในการใช้งาน :

CR-40 : เนื้อโลหะรอยเชื่อมเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีเฟอร์ไรต์ มีสมบัติแข็งตัวด้วยตัวเอง ซึ่งทำให้ได้ความสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่า

CR-40 Cb : เนื่องจากอิเล็กโตรดชนิดนี้มีปริมาณที่เหมาะสมของ Al, Ti และ Nb ดังนั้นจึงได้โครงสร้างเฟอร์ไรติกที่มีเกรนละเอียด เนื้อโลหะรอยเชื่อมให้ความสามารถในการอ่อนตัวและความเหนียวบวกที่ดีกว่า ด้วยความสามารถในการเชื่อมที่ดีเยี่ยมเนื่องจากไม่มีสมบัติแข็งตัวด้วยตัวเอง ดังนั้นจึงไม่สามารถทนทานต่อการสึกหรอ

## ข้อควรจำในการใช้งาน

1. อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมและระหว่างเที่ยวเชื่อมและอุณหภูมิ PWHT ควรเป็นดังต่อไปนี้

ชื่อผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมและระหว่างเที่ยวเชื่อม	PWHT
CR-40	200 – 400 °C	700-760 °C
CR-40 Cb	100 – 250 °C	700 – 760 °C

2. อ้างถึงหน้าที่ 276

## สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

ชื่อผลิตภัณฑ์	C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb
CR-40	0.08	0.37	0.29	0.020	0.003	12.87	-
CR-40 Cb	0.08	0.37	0.43	0.018	0.003	13.37	0.77

### สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

ชื่อผลิตภัณฑ์	0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm)	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	PWHT
CR-40	290 (30)	510 (52)	33	850 °C x 2 hr(FC ➤ 600 °C , AC < 600 °C)
CR-40 Cb	270 (27)	500 (51)	35	

### ขนาดต่าง ๆ

Dia (mm) L (mm)	2.0	2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
CR-40	250	300	350	400	400	400
CR-40 Cb	-	300	350	400	400	400

CR-43

JIS Z3221 D430-16

AWS A5.4 E430-16

CR-43 Cb

JIS Z3221 D430Nb-16

AWS A5.4 (E430 -16)

### การนำไปใช้งาน

CR-43 , CR-43Cb : การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คของเหล็กกล้าไร้สนิม 17% Cr เช่น SUS430

### สมบัติพิเศษในการใช้งาน

CR-43 : อีเล็กโทรดชนิดโลหะไทเทเนียมสำหรับการเชื่อมในทุกแนวการเชื่อม โดยจะให้ความสามารถในการทนทานต่อกรดไนตริกและทนทานต่อการเกิดออกซิเดชันได้ดี

CR-43 Cb : อีเล็กโทรดชนิดโลหะไทเทเนียมสำหรับการเชื่อมในทุกแนวการเชื่อมด้วยความสามารถในการใช้งานที่ดี เนื่องจากเนื้อโลหะรอยเชื่อมมีปริมาณที่เหมาะสมของ Al , Ti และ Nb, ดังนั้นจึงได้โครงสร้างเฟอร์ไรท์ที่ละเอียด และมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน และการออกซิเดชันได้ดี อีกทั้งยังมีค่าการกระแทกที่ดีอีกด้วย



### ข้อควรจำในการใช้งาน

1. อุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมและระหว่างท่ียวเชื่อมและอุณหภูมิ PWHT ควรเป็นดังนี้

ชื่อผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมและระหว่างท่ียวเชื่อม	PWHT
CR-43	150 – 250 °C	700-820 °C
CR-43 Cb	100 – 200 °C	700-820 °C

### สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

ชื่อผลิตภัณฑ์	C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb
CR-43	0.09	0.40	0.29	0.021	0.003	17.39	-
CR-43 Cb	0.09	0.46	0.40	0.020	0.002	17.24	0.80

### สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

ชื่อผลิตภัณฑ์	0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J(kgf-m)	PWHT
CR-43	300 (31)	550 (56)	27	5 (0.5)	770 °C x2 hr (FC > 600 °C AC < 600 °C)
CR-43 Cb	300 (31)	540 (55)	32	75 (7.7)	

### ขนาดต่างๆ

Dia (mm) L (mm)	2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
CR-43	-	350	400	400	-
CR-43 Cb	300	350	400	400	400

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม (การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค)

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		การนำไปใช้งานและลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)
	JIS	AWS		
NC-39 MoL	Z3221	A5.4	สามารถใช้กับการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันของ เหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กคาร์บอนหรือ เหล็กกล้าเจือต่ำ การเชื่อมชั้นเชื่อมด้านล่างของ ร่องเชื่อมด้านข้างที่ถูกเคลือบของ SUS316 หรือ SUS316L และการเชื่อมชั้นเชื่อมด้านล่างของ การเชื่อมพอกของเนื้อโลหะรอยเชื่อมชนิด 316 หรือ 316L กับเหล็กคาร์บอนหรือเหล็กกล้าเจือ ต่ำ  ความสามารถในการเชื่อมดีเนื่องจากมีปริมาณ ของเฟอร์ไรต์มากและมีความต้านทานการกัด กร่อนของกรดซัลฟูริกเจือจางได้ดีขึ้นเนื่องจากมี ส่วนผสมของ Mo	2.6
	D309	E309		3.2
	MoL-16	Mo-16		4.0
				5.0
NC-30	Z3221	A5.4	สามารถใช้ได้กับเหล็กกล้าไร้สนิม 25% Cr- 20% Ni (SUS310S) ดีเยี่ยมในด้านทนทานต่อ ความร้อน การกัดกร่อน และสมบัติทางกลอัน เนื่องมาจากโครงสร้างทั้งหมดเป็นออสเทนไนต์ ที่คงตัว	2.0
	D310	E310		2.6
	-16	-16		3.2
				4.0
				5.0

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม (การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค) (ต่อ)

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		การนำไปใช้งานและลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)
	JIS	AWS		
NC-37	Z3221	A5.4	สามารถใช้กับเหล็กกล้าไร้สนิม 18% Cr-8 % Ni-Nb (SUS347) และ 18% Cr-8 % Ni-Ti (SUS321) สามารถต้านทานการแตกร้าวได้ดี และมีความสามารถในการเชื่อมที่ดีเนื่องจาก การควบคุมปริมาณเฟอร์ไรต์ที่ดี ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนใน กรดดีเอชเอ็มและทนต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิ สูงขึ้นเนื่องจากส่วนผสมของ Nb NC-37L ช่วย ให้สามารถต้านทานการกัดกร่อนตามของกรด ได้ดีขึ้น	1.6
	D347	E347		2.0
	-16	-16		2.6
				3.2
				4.0
				5.0
NC-37L	Z3221	A5.4		6.0
	D347L	E347		2.6
	-16	-16		3.2
				4.0
				5.0
				6.0

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)								สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม				การทดสอบ สเตร้าส์
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	อื่น ๆ	0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J(kgf-m)	
0.031	0.40	1.36	0.023	0.003	12.96	23.56	Mo 2.24	410 (42)	600 (61)	41	-	-

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไป ของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)								สมบัติทางกลโดยทั่วไป ของเนื้อโลหะรอยเชื่อม				การ ทดสอบ สเตร้าส์
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	อื่น ๆ	0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J(kgf-m)	
0.10	0.43	2.20	0.010	0.003	20.81	25.81	-	410 (42)	600 (61)	40	-	-
0.06	0.54	1.62	0.021	0.004	9.86	19.41	Nb 0.70	450 (46)	630 (64)	36	-	ไม่มีผล
0.03 6	0.51	2.18	0.023	0.002	10.18	18.75	Nb 0.52	430 (44)	620 (63)	43	-	ไม่มีผล

ข้อควรจำในการใช้งาน : สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค

1. ช่วงของกระแสไฟเชื่อม

ช่วงของกระแสไฟเชื่อม (แอมแปร์) (AC หรือ DC-EP)

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	Dia (mm) L (mm)	1.6	2.0	2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
NC-series	F, HF	15~40	25~55	50~85	70~115	95~145	135~180	160~210
CR-series	V, OH	15~35	20~50	45~80	65~110	85~135	-	-
CR-Cb series	F, HF	-	-	60~85	70~115	100~145	135~180	160~210
	V, OH	-	-	50~80	65~105	95~140	-	-

2. ต้องไม่ใช้กระแสไฟเชื่อมที่มากเกินไปกว่ากระแสไฟที่เหมาะสมเพราะว่า กระแสไฟเชื่อมที่สูงมากเกินไปเป็นสาเหตุให้มีความสามารถในการใช้งานที่ต่ำ และสมบัติทางกลของเนื้อโลหะเดิมก็จะลดลงอันเนื่องมาจากอิเล็กโตรดร้อนมากเกินไป
3. รักษาระยะอาร์คให้สั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้
4. ความกว้างในการส่ายควรจะเป็นสองเท่าครึ่งของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโตรด

HF - 240

JIS Z3251 DF 2A-250-R

สำหรับการเชื่อมระหว่างโลหะกับโลหะบาง ๆ

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมพอกผิวแข็งของเฟืองและวงล้อ

คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

HF-240 เป็นอิเล็กโตรดหุ้มฟลักซ์ชนิดไททาเนียม ซึ่งทำให้มีการกำจัดตะกรันที่ดีขึ้นและตะเข็บเชื่อมเป็นมันวาว

เนื้อโลหะรอยเชื่อมทำการแปรรูปได้ง่ายด้วยเครื่องมือตัดความเร็วสูงและสามารถนำไปชุบแข็งได้หลังจากการแปรรูป

ข้อควรจำในการใช้งาน

1. ในกรณีของการพอกผิวแข็งบนเหล็กงานหล่อและงานชุบขึ้นรูปขนาดใหญ่ เหล็กกล้าเจือดำหรือเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ให้ทำการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมที่ 150 °ซ.

## 2. อ้างถึงหน้าที่ 289

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.09	0.58	0.58	0.016	0.013	0.81

ความแข็งโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (ความแข็งวิกเกอร์)

As welded	PWHT	
Pre H, IPT 150 °C	900 °C, OQ	อบอ่อนที่ 650 °ซ x 2 ชม หลังจาก 900 °ซ. OQ
251	350	215

ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC or DC-EN )

Dia (มม.)		3.2	4.0	5.0	6.0
L (มม.)		350	400	400	400
Amp	F	60~110	110~160	160~210	200~260
	V & OH	50~100	90~140	130~150	-

HF-350

JIS Z3251 DF2A-400-B

สำหรับการเชื่อมระหว่างโลหะกับโลหะ

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมพอกผิวแข็งของลูกกลิ้งอันบนและเฟืองโซ่ของรถขุดมูลโคเซอร์

คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

HF-350 เป็นอิเล็กโทรดสำหรับการเชื่อมระหว่างโลหะกับโลหะซึ่งความแข็งและความเหนียวจะมีค่าสมดุลกัน

อิเล็กโทรดนี้ยังสามารถใช้ได้กับการขัดถูด้วยแรงกระแทกปานกลาง การแปรรูปเนื้อโลหะรอยเชื่อมสามารถกระทำได้ และความแข็งสามารถทำให้เพิ่มขึ้นโดยการชุบแข็งหลังจากที่ผ่านการแปรรูปแล้ว

### ข้อควรจำในการใช้งาน

1. โดยทั่วไปไม่จำเป็นต้องทำการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมอย่างไรก็ตามเหล็กงานหล่อและงานชุบขึ้นรูปขนาดใหญ่ เหล็กกล้าเจือดำ หรือเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ควรที่จะทำการอุ่นก่อนเชื่อมที่อุณหภูมิ 150 °ซ. และอุณหภูมิที่สูงกว่าบนการเชื่อมพอกผิวแข็ง
2. เนื่องจากการแปรรูปอาจทำได้ยากเนื่องจากการแข็งตัวในกรณีที่มีการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงต้องมีการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมและให้ความร้อนหลังการเชื่อมในทันที
3. อ้างถึงหน้าที่ 289

### สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.25	0.49	1.38	0.010	0.008	1.16

### ความแข็งโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (ความแข็งวิกเกอร์)

As welded	PWHT	
Pre H, IPT 150 °C	850 °C, OQ	อบอ่อนที่ 650 °ซ x 2 ชม หลังจาก 850 °ซ. OQ
391	510	295

### ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC or DC-EN )

Dia (มม.)		2.6	3.2	4.0	5.0	6.0	7.0
L (มม.)		300	350	400	400	450	450
A m p	F	65 ~90	90~130	140~180	190~240	220~300	250~350
	V & OH	65~85	80~120	110~170	-	-	-

HF-500

JIS Z3251 DF2B-500-B

สำหรับการเชื่อมและการขัดถูไม่หนักมากระหว่างโลหะกับโลหะ

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมพอกผิวแข็งของชิ้นส่วนข้อต่อของรถขุดมูลโคเซอร์

คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

HF-500 เติมน้ำให้เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีโครงสร้างมาร์เทนไซด์ซึ่งมีความเหนียวที่ดี สามารถนำมาใช้  
ได้กับการเชื่อมระหว่างโลหะกับโลหะและการขัดถูโดยการกระแทกไม่แรงนัก เนื้อโลหะเชื่อม  
นำไปทำการแปรรูปได้ยาก

ข้อควรจำในการใช้งาน

1. โดยทั่ว ๆ ไปทำการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมที่ 150 °ซ.
2. ในกรณีของการเชื่อมพอกหลายชั้นเชื่อมหรือการเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็กงานหล่อ  
และงานทุบขึ้นรูปขนาดใหญ่ เหล็กกล้าเจือดำ หรือเหล็กกล้าคาร์บอนสูงควรจะทำ  
การเชื่อมที่ชั้นเชื่อมด้านล่างด้วยอิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำสำหรับเหล็กถลุง
3. อ้างถึงหน้าที่ 289

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Mo	V
0.32	1.37	1.15	0.013	0.003	0.98	0.28

ความแข็งโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (ความแข็งวิกเกอร์)

As welded	
Pre H, IPT 150 °C	Pre H, IPT 150 °C
517	392

ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟฟ้าที่แนะนำให้ใช้ (AC or DC-EP )

ขนาดต่าง ๆ และกระเปาะเหล็กและสกรู (10-11)					
Dia (มม.)		3.2	4.0	5.0	6.0
L (มม.)		350	400	400	400
Amp	F	90 ~130	140~180	190~240	220~300



**HF-600****JIS Z3251 DF2B-600-B**

สำหรับการเชื่อมและการขัดถูระหว่างโลหะกับโลหะ

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมพอกผิวแข็งของลูกกลิ้งตัวล่างและที่ขอบของถังชุด

คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

HF-600 เป็นอิเล็กโทรดที่การเติมได้เนื้อโลหะรอยเชื่อมเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ สามารถที่จะใช้ได้กับส่วนที่มีการขัดถูด้วยการกระแทกไม่หนักนัก ในสถานะที่ผ่านการเชื่อมมาแล้วจะนำมาแปรรูปได้ยาก

ข้อควรจำในการใช้งาน

1. โดยทั่วไปทำการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมที่ 150 °ซ.
2. ในกรณีของการเชื่อมพอกหลายชั้นเชื่อมหรือการเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็กงานหล่อและงานทุบขึ้นรูปขนาดใหญ่ เหล็กกล้าเจือดำ หรือเหล็กกล้าคาร์บอนสูงควรจะทำ การเชื่อมที่ชั้นเชื่อมด้านล่างด้วยอิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำสำหรับเหล็กถนุ
3. อ้างถึงหน้าที่ 289

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.48	0.88	2.58	0.014	0.009	2.50

ความแข็งโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (ความแข็งวิกเกอร์)

As welded	
Pre H, IPT 150 °C	Pre H, IPT 300 °C
595	405

ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC or DC-EP )

Dia (มม.)		2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
L (มม.)		300	350	400	400	400
Amp	F	60~90	90 ~130	140~180	190~240	220~300

HF-650

JIS Z3251 DF3C-600-B

สำหรับการขัดถูด้วยทรายและการสึกหรอระหว่างโลหะกับโลหะ

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมพอกผิวแข็งของแม่พิมพ์ตัดและใบมีดเครื่องผสม

คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

HF-650 เป็นอิเล็กโทรดที่ให้ความแข็งแกร่งที่เพราะว่าอิเล็กโทรดมีธาตุเจือที่ทำให้เกิดคาร์ไบด์เช่น Cr, W, Mo, V

เนื่องจากเนื้อโลหะรอยเชื่อมมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่คงตัว ดังนั้นจึงสามารถใช้ได้กับการขัดถู การแปรรูปไม่สามารถกระทำกับเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่อยู่ในสถานะผ่านการเชื่อม

ข้อควรจำในการใช้งาน

1. ทำการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมที่ 150 °ซ.
2. ต้องให้การอบทางความร้อนหลังการเชื่อมที่ประมาณ 600 °ซ.
3. ในกรณีของการเชื่อมพอกหลายชั้นเชื่อม หรือการเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็กงานหล่อ และงานชุบขึ้นรูปขนาดใหญ่ เหล็กกล้าเจือดำหรือเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ควรจะทำการเชื่อมที่ชั้นเชื่อมด้านล่างด้วยอิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำสำหรับเหล็กถนุ
4. อ้างถึงหน้าที่ 289

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	V
0.67	0.90	0.87	0.008	0.008	5.23	1.17	1.42	0.55

ความแข็งโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (ความแข็งวิกเกอร์)

ความแข็งที่ RT			ความแข็งที่อุณหภูมิขึ้น	
As welded		PWHT		
Pre H, IPT 150 °C	Pre H, IPT 300 °C	600 °C x 1 hr Ac	400 °C	600 °C
634	673	580	480	375

ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC or DC-EP )

Dia ( มม.)		2.6	3.2	4.0	5.0	6.0
L ( มม.)		300	350	400	400	400
Amp	F	75~95	110 ~130	140~170	180~210	220~300

HF-800 K

JIS Z3251 DF3C-700-B

สำหรับการขัดถูอย่างหนัก

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมพอกผิวแข็งใบมีดเครื่องตัดและฝากรอบ

สมบัติพิเศษในการใช้งาน

HF-800K ที่เติมลงในเนื้อโลหะรอยเชื่อมได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่แข็งแรงมาก ซึ่งมีการตกตะกอนของคาร์บอนและบอโรด์กระจายอยู่ทั่วไป สามารถนำไปใช้งานที่มีการขัดถูได้ดีในส่วนที่เนื้อโลหะรอยเชื่อมโครงสร้างมาร์เทนไซต์ธรรมดาไม่สามารถใช้ได้

การเชื่อมพอกหลายชั้นเชื่อมไม่สามารถกระทำได้นี้เนื่องจากมีความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวที่ต่ำ เพราะความแข็งของเนื้อโลหะรอยเชื่อมนี้สูงมาก

การแปรรูปไม่อาจจะกระทำได้อีกกับเนื้อโลหะรอยเชื่อมในสถานะผ่านการเชื่อมมาแล้ว

ข้อควรระวังในการใช้งาน

1. โดยทั่ว ๆ ไปทำการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมที่ 200 °ซ.
2. ต้องทำการอุ่นชิ้นงานหลังเชื่อมที่ประมาณ 600 °ซ.
3. ทำการเชื่อมชั้นเชื่อมด้านล่างด้วยอิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำสำหรับเหล็กถนอม
4. อ้างถึงหน้าที่ 289

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม %

C	Si	Mn	P	S	Cr	W	B
0.80	1.65	1.24	0.009	0.005	3.82	2.42	0.28

ความแข็งโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (ความแข็งวิกเกอร์)

As welded		PWHT
Pre H, IPT 200 °C	Pre H, IPT 300 °C	600 °C x 1 hr Ac
752	810	535

ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟที่แนะนำให้ใช้ (AC or DC-EP )

Dia (มม.)		3.2	4.0	5.0	6.0
L (มม.)		350	400	400	450
Amp	F	90 ~130	130~180	190~240	220~300

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับการพอกผิวแข็ง (การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค)

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน JIS	การนำไปใช้งาน และลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)
MC-16	-	สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้า 13%Mn แผ่นเหล็กทางข้าม รางรถไฟและแผ่นเหล็กกันกระสุนปืน เนื้อโลหะรอย เชื่อมที่ได้จะเป็นโครงสร้างออสเตนไนติกที่คงตัวและ ให้ความแข็งแรงทางดึงทางเหนียวและความทนทานการ สึกหรอที่สูง อิเล็กโทรดนี้สามารถใช้ต่อเหล็กที่ต่าง ชนิดกันของเหล็กกล้ามังกานีสสูงและเหล็กกล้าชนิดอื่น ๆ และใช้สำหรับการเชื่อมที่ชั้นเชื่อมด้านล่างของการพอก ผิวแข็งเนื้อโลหะรอยเชื่อม 13% Mn ในการเชื่อม เหล็กกล้ามังกานีสสูงจะต้องไม่ทำการ PWHT และ กระแสไฟในการเชื่อมควรจะใช้ให้น้อยที่สุดเพื่อที่จะ ป้องกันการเกิดความเปราะโดยการให้ความร้อนมาก เกินไปกระแสไฟที่เหมาะสมคือ AC หรือ DC-EP	3.2
			4.0
			5.0

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับการพอกผิวแข็ง (การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค) (ต่อ)

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน JIS	การนำไปใช้งาน และลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)
		สำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็งโครงสร้างที่ถูกขูดขีดโดย แรงกระแทกอย่างแรง เช่น ค้อนบด และฟันบด สำหรับการเชื่อมซ่อมแซมของเหล็กกล้า 13%Mn เนื้อ โลหะรอยเชื่อมที่ได้มีความเหนียวดีเยี่ยม และมีสมบัติการ	

HF-11	Z3251	แข็งตัวที่สูง เนื่องจากโครงสร้างอสเทนไนท์โดยการเย็น	3.2
	DFMA	ตัวอย่างเร็วในระหว่างการเชื่อม การแปรรูปเนื้อโลหะรอย	4.0
	-250-B	เชื่อมทำได้ยาก การเย็นตัวลงอย่างระหว่งการเชื่อมมีความ	5.0
		จำเป็น แต่การ PWHT ต้องไม่ถูกระงับเพื่อป้องกันการ ลดลงของความเหนียว การเชื่อมชั้นเชื่อมด้านล่างจำเป็นต้อง ใช้ MC-16 หรือ NC-39 สำหรับเหล็กกล้าอื่น ๆ นอกเหนือจากเหล็กกล้า 13% Mn กระแสไฟที่เหมาะสมคือ AC หรือ DC-EP	6.0

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)								สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม		
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	TS N/mm <sup>2</sup>	EI %	IV J(kgf-m)
0.14	0.63	16.89	0.018	0.004	2.21	15.30	0.12	780 (80)	37	20 °C 120 (12)

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)											ความแข็ง วิกเกอร์	หมายเหตุ
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	W	อื่นๆ		
0.82	0.39	13.88	0.010	0.005	-	-	-	-	-	-	225	Pre.H& IPT : RT

											515	Pre. H&IPT : RT หลังจากทำ ให้แข็ง
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-----	--

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับการพอกผิวแข็ง (การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค) (ต่อ)

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน JIS	การนำไปใช้งาน และลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)
HF-12	Z3251 DF3C -500-B	สำหรับการพอกผิวแข็งของโครงสร้างที่ถูกรัดถูกโดยการกระแทกอย่างเบาเช่น ฟันตัด ใบพัด และอุปกรณ์การหยุดเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่ได้จะเป็นโครงสร้างผสมของมาร์เตนไซต์และออสเตนไนท์ และสามารถทำให้แข็งได้โดยการให้ความร้อนก่อนเชื่อมและการ PWHT การแปรรูปของเนื้อโลหะรอยเชื่อมทำได้ยากในสถานะผ่านการเชื่อมมาแล้วการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมกระทำได้ 200°ซ. PWHT 600°ซ. ถ้าทำได้และการเชื่อมด้านล่างต้องใช้อิเล็กโทรดชนิดไฮโดรเจนต่ำสำหรับเหล็กดุนกระแสไฟที่ใช้ได้เหมาะสมคือ AC หรือ DC-EP	2.6 3.2 4.0 5.0 6.0

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับการพอกผิวแข็ง (การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค) (ต่อ)

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน JIS	การนำไปใช้งาน และลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)
HF-16	Z3251 DFME -300-B	สามารถใช้ได้กับการสึกหรอที่เกิดขึ้นโดยอุณหภูมิสูงขึ้นหรือการกระแทก ใช้สำหรับการพอกผิวแข็งของใบมีดเขียงที่ร้อน ใบเลื่อยร้อน ตัวนำเครื่องบริดและแม่พิมพ์งานทุบร้อนเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะมีโครงสร้างออสเตนไนท์ที่คงตัวเนื่องจากความแข็งจะลดลงเล็กน้อยที่ 700°ซ. ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการซ่อมวัสดุที่ใช้งานในอุณหภูมิสูง การแปรรูปสามารถกระทำได้โดยใช้เครื่องมือตัดทั้งรตนดาร์ไบต์ควรจะ	3.2 4.0 5.0

		ใช้การเชื่อมชั้นเชื่อมด้านล่างและทำการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม ที่ 150°ซ. กระแสไฟที่เหมาะสมคือ AC หรือ DC-EP	
--	--	--	--

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)											ความ แข็งวิค เกอร์	หมายเหตุ
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	W	อื่นๆ		
0.61	0.89	1.26	0.011	0.010	-	7.30	1.12	-	-	-	595	Pre.H& IPT : 300 °C
											630	PWHT 500 °C x2 hr

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)											ความ แข็งวิค เกอร์	หมายเหตุ
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	W	อื่นๆ		
0.83	0.62	15.62	0.020	0.005	2.20	15.33	1.84	0.42	-	-	314(RT) 240 (600 °C) 210 (700 °C) 205 (800 °C)	Pre.H & IPT:150 °C

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน JIS	การนำไปใช้งาน และลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)
HF-260	Z325 1 DF2 A- 300- B	สำหรับการพอกผิวแข็งของโครงสร้างที่ใช้กับการสึกหรอไม่รุนแรงระหว่างโลหะกับโลหะเช่น เพลา , ข้อต่อและล้อเกวียน อิเล็กทรอนิกส์เป็นชนิดไฮโดรเจนต่ำ และสามารถใช้เป็นชั้นเชื่อมด้านล่างของการพอกผิวแข็งได้ เนื้อโลหะรอยเชื่อมสามารถถูกแปรรูปได้ง่ายและสามารถถูกชุบแข็งได้หลังจากการแปรรูปแล้ว กระแสไฟที่เหมาะสมกับการใช้คือ AC หรือ DC-EP	2.6 3.2 4.0 5.0 6.0
HF-330	Z325 1 DF2 A- 350- R	สำหรับการพอกผิวแข็งโครงสร้างที่ใช้กับการสึกหรอไม่รุนแรงระหว่างโลหะกับโลหะเช่น ลิ้มต่าง ๆ และหัวควอเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เป็นชนิดไททานีเนียมซึ่งมีความสามารถในการกำจัดตะกอนได้ดี และตะเข็บเชื่อมมีความสวยงามดีมาก เนื้อโลหะรอยเชื่อมสามารถถูกแปรรูปได้ง่ายและชุบแข็งได้กระแสไฟที่เหมาะสมก็คือ AC หรือ DC-EN	3.2 4.0 5.0 6.0

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน JIS	การนำไปใช้งาน และลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)
HF-450	Z325 1 DF2 A- 450 - E	สำหรับการพอกผิวแข็งโครงสร้างที่ใช้กับการสึกหรอระหว่างโลหะกับโลหะและการขัดถูที่ไม่รุนแรงนัก เช่น เพืองอิสระ ลูกกลิ้งและข้อต่อของรถขุดมูลโดเซอร์อิเล็กทรอนิกส์จะให้ความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวดีขึ้นและมีความแข็งแรงที่คงตัวเนื่องจากมีความต้านทานดีขึ้นเมื่อทำการอบอ่อน (tempering) การแปรรูปก็ยุ่งยากเพียงเล็กน้อย ส่วนกระแสไฟที่เหมาะสมก็คือ AC หรือ DC-EP	4.0 5.0 6.0



สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)										ความ แข็ง วิกเกอร์	หมายเหตุ
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	W		
0.17	0.69	1.91	0.013	0.009	-	-	-	-	-	278	Pre.H & IPT : 150 °C
										395	PWHT : 900°C OQ
										250	PWHT : 900 °C OQ + 650°C x2hr
0.09	0.69	0.86	0.014	0.010	-	2.2 9	-	-	-	340	Pre.H & IPT : 150 °C

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)										ความ แข็งวิก เกอร์	หมายเหตุ
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	W		
0.20	1.21	0.39	0.011	0.008	-	2.54	0.57	0.30	-	452	Pre.H & IPT : 150°C
										408	Pre.H & IPT : 300 °C
										443	PWHT : 550 °C x6hr
										348	PWHT : 625 °C x6hr

## ข้อควรจำในการใช้งาน สำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง

### 1. ทัวไป

สิ่งสำคัญสำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็งคือการทำให้อุณหภูมิและความเค้นต่ำลงและให้มีการแตกร้าวน้อยที่สุด เพื่อที่จะให้บรรลุถึงสิ่งเหล่านี้จึงจำเป็นต้องเลือกใช้อิเล็กโทรดที่เหมาะสมและวิธีดำเนินการเชื่อมที่จะอธิบายต่อไปนี้จะต้องทำตามด้วย

#### 1. การเตรียมโลหะชิ้นงาน

สนิมและสิ่งปนเปื้อนเช่นคราบน้ำมันและทรายเป็นสาเหตุให้เกิดโพรงก๊าซ รอยแตกร้าวนในแผ่นชิ้นงานอาจทำให้เกิดการแตกร้าวนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมดังนั้นสิ่งเหล่านี้จะต้องถูกกำจัดออกให้หมดก่อนที่จะนำไปใช้งาน

#### 2. ควบคุมความร้อนและอุณหภูมิ

เพื่อที่จะทำให้เกิดการแตกร้าวน้อยที่สุด สิ่งต่อไปนี้จะต้องนำมากระทำ

##### 1. อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมและระหว่างเปลี่ยนเทียเชื่อม

ทั้งสองสิ่งนี้มีผลต่อการทำให้เกิดการแตกร้าวน้อยที่สุด ตารางที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนเทียบเท่าของโลหะชิ้นงานและอุณหภูมิต่ำสุดที่ต้องการในการป้องกันการแตกร้าวนในการปฏิบัติงานเชื่อม ขนาดของโครงสร้างชนิดของอิเล็กโทรด และกรรมวิธีการเชื่อม จะต้องกระทำโดยการพิจารณาข้อกำหนดของอุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ 11.2 ข้ออ้างอิงสำหรับอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมและระหว่างเปลี่ยนเทียเชื่อม VS คาร์บอนเทียบเท่าที่แตกต่างกันของโลหะชิ้นงาน

ชนิดของเหล็ก	คาร์บอนเทียบเท่า (Ceq)	Pre. H & IPT (°C)
เหล็กคาร์บอนและเหล็กกล้า เจือดำ	~0.3	≤ 100
	0.3~0.4	≥ 100
	0.4~0.5	≥ 150
	0.5~0.6	≥ 200
	0.6~0.7	≥ 250
	0.7~0.8	≥ 300
	0.8~	≥ 350
เหล็กกล้า Mn สูง		ไม่ Pre.H เย็นตัวลงในน้ำใน การเปลี่ยนเทียเชื่อม
เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติก		≤ 150
เหล็กกล้าเจือโคร (ชนิด Cr สูง)		≥ 400

## 2. การให้ความร้อนหลังเชื่อมในทันที

ใช้ความร้อนที่ 300-350 °ซ. เป็นเวลา 10-30 นาที หลังจากเชื่อมเสร็จในทันทีจะทำให้ได้ผลดีในการป้องกันการแตกร้าว ควบคุมอุณหภูมิอย่างระมัดระวังเพราะว่าความแข็งแรงจะลดลงโดยความร้อนที่สูงขึ้นมากเกินไป

## 3. การใช้กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม (PWHT)

ทำการอบความร้อนที่ 550-750 °ซ. จะมีผลดีสำหรับการป้องกันการแตกร้าวและการบิดตัวในการใช้งาน นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติของเนื้อโลหะรอยเชื่อมให้ดีขึ้นในการตั้งเงื่อนไขของ PWHT จะต้องดูการลดลงของความแข็งแรง เพราะความแข็งแรงของเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะลดลงโดยการ PWHT

## 3. การเชื่อมชั้นเชื่อมด้านล่าง (Underlaying)

การเชื่อมชั้นเชื่อมด้านล่างจะมีผลดีต่อการป้องกันการแตกร้าวเมื่อโลหะชิ้นงานที่มีความสามารถในการแข็งตัวสูงเช่น เหล็กกล้าเจือดำจะถูกเชื่อมพอก และเมื่อเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูงมากจะถูกทำการเติมเนื้อโลหะสำหรับการเชื่อมชั้นเชื่อมด้านล่าง อิเล็กโทรดสำหรับเหล็กคาร์บอนซึ่งมีความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวที่ดี หรืออิเล็กโทรดเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนไนติกควรที่จะถูกนำมาใช้งาน

## 4. การซึมลึก (Penetration)

ในการเชื่อมพอกผิวแข็ง สมบัติของเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยการซึมลึกของโลหะชิ้นงาน เพราะส่วนผสมทางเคมีของอิเล็กโทรดปกติแล้วจะแตกต่างจากโลหะชิ้นงาน เพื่อที่จะใช้อิเล็กโทรดอย่างได้ผลดี ดังนั้นการซึมลึกจะต้องถูกควบคุมอย่างระมัดระวังและการเชื่อมชั้นเชื่อมหลายชั้นควรจะทำถ้าจำเป็น

## 5. การบิดตัวในการเชื่อม

การเชื่อมแบบเว้นระยะและการเชื่อมแบบสมนัยจะมีผลทำให้เกิดการบิดตัวน้อยที่สุดการยึดก่อนการเชื่อมก็เป็นข้อแนะนำที่ทำให้เกิดการบิดตัวน้อยที่สุด

### 2. การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค

1. ความยาวอาร์คจะต้องถูกควบคุมให้สั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ และวิธีการเชื่อมก้ำวลอยสำหรับการเริ่มต้นอาร์คก็เป็นข้อแนะนำที่จะช่วยป้องกันการเกิดโพรงก๊าซ
2. ความกว้างในการส่ายต้องควบคุมให้น้อยกว่า 3-4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรด

CIA -1

JIS Z3252 DFCNi

AWS A5.15 ENi-CI

CIA - 2

JIS Z3252 DFCNiFe

AWS A5.15 ENiFe-CI

CIA - 3

JIS Z3252 DFCFe

AWS A5.15 (ESi)

สำหรับการเชื่อมเหล็กหล่อ

การนำไปใช้งาน

การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์คสำหรับการซ่อมและการต่อเหล็กหล่อชนิดต่าง ๆ

คุณลักษณะพิเศษในการใช้งาน

CIA-1 : อิเล็กโตรดหุ้มฟลักซ์ชนิดเปลือกหุ้มฟลักซ์เกรไฟต์และแกนลวดเชื่อมนิเกิลบริสุทธิ์

การแข็งตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่น้อยที่สุด และบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ของเหล็กหล่อเป็น CIA-1 ดังนั้นจึงมีความสามารถในการเชื่อมและการแปรรูปดีเยี่ยม

CIA -2 : อิเล็กโตรดหุ้มฟลักซ์ชนิดเปลือกหุ้มฟลักซ์เกรไฟต์และแกนลวดเชื่อมเจือ 55 % Ni-Fe

การแข็งตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะน้อยกว่า CIA-3 และความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวจะดีเยี่ยม

CIA-3 อิเล็กโตรดชนิดไฮโดรเจนต่ำที่แกนลวดเชื่อมเป็นเหล็กบริสุทธิ์ การแข็งตัวของรอยเชื่อมจะมากกว่า CIA-1 และ CIA-2 ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการที่ไม่ต้องมีการแปรรูปหลังการเชื่อม

ข้อควรจำในการใช้งาน

อ้างอิงหน้า 289

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Fe
CIA-1	0.97	0.22	0.62	0.003	0.002	Bal	1.84
CIA-2	0.99	0.28	1.90	0.007	0.002	54.3	Bal
CIA-3	0.04	0.43	0.44	0.007	0.007	-	Bal

## สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

ชื่อผลิตภัณฑ์	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %
CIA-1	480(49)	-
CIA-2	520(53)	-
CIA-3	490(50)	33

## ขนาดต่าง ๆ และกระแสไฟฟ้าที่แนะนำให้ใช้ (AC or DC-EP)

Dia (mm)			2.6	3.2	4.0	5.0
L (mm)			300	* <sup>1</sup> 300,350	* <sup>2</sup> 350,400	350
Amp	F	CIA-1	-	80~130	110~160	150~210
		CIA-2	60~90	80~120	120~150	-
		CIA-3	60~90	90~130	120~160	-

\*<sup>1</sup> 300 mm : CIA 2 , \*<sup>2</sup> 400 mm : CIA 3

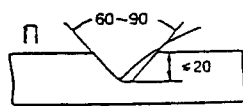
## ข้อควรระวังในการใช้งาน : สำหรับเหล็กหล่อ

## 1. การเตรียมโลหะขึ้นงาน

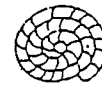
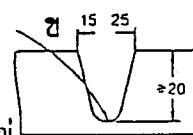
- เมื่อโลหะขึ้นงานมีน้ำมันปนเปื้อนอยู่จะต้องนำมาให้ความร้อนที่ 400 ซิ. เพื่อให้น้ำมันออกไปให้หมด สิ่งเปราะเปื้อนอื่น ๆ ก็ควรกำจัดออกด้วยเช่นกัน
- สำหรับการซ่อมแซมนั้น สิ่งบกพร่องจะต้องกำจัดออกให้หมดการเจาะรูขวางควรจะทำที่ปลายทั้งสองข้างของรอยแตกเมื่อมันดูเหมือนจะขยายตัวออกไป
- การแปรรูปและการเจียรนัยถูกแนะนำให้ใช้ในการเตรียมร่องเชื่อม ส่วนการเซาะร่องด้วยการอาร์คแล้วเป่าด้วยอากาศไม่ถูกแนะนำให้ใช้ รอยแตกที่โลหะขึ้นงานต้องกำจัดออกให้หมดและด้านล่างของร่องเชื่อมควรทำให้กลม ดังรูปที่ 1

## 2. วิธีดำเนินการเชื่อม

1. อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานเชื่อมขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาของโลหะชิ้นงานอย่างไรก็ตามควรจะดูที่ ตาราง
2. ความยาวของหนึ่งตะเข็บรอยเชื่อมควรจะมีมากที่สุดประมาณ 50 มม. เพื่อป้องกันความร้อนมากเกินไป การบิดตัวและการแตกร้าวและการเชื่อมแบบเป็นเส้นถูกแนะนำให้ใช้
3. จำเป็นต้องมีการพินนิ่งเพื่อให้มีความเค้นตกค้างน้อยที่สุดหลังจากการเชื่อมแต่ละรอยเชื่อมจะต้องทำการพินนิ่งที่ตะเข็บด้วยค้อนทุบที่จนกระทั่งเกร็ดรอยเชื่อมหายไป
4. ร่องเชื่อมที่เป็นกรวยเล็ก ๆ ควรทำการเชื่อมแบบวนเฉียงจากด้านล่างของร่องเชื่อมดังรูปที่ 2 ลำดับการเชื่อมแบบก้ามถอย แบบสมนัย และแบบเว้นระยะถูกแนะนำให้ใช้สำหรับรอยต่อยาว ๆ เพื่อป้องกันการแตกร้าว ตามตารางที่ 1 วิธีการเชื่อมเคลือบ (Buttering) ก็ถูกแนะนำให้ใช้กับร่องเชื่อมที่ลึก ๆ ดังรูปที่ 3



ทำให้กลม



(ก) สำหรับสิ่งบกพร่องเล็ก (ข) สำหรับสิ่งบกพร่องใหญ่

รูปที่ 2 เทคนิคการ เชื่อมวนเฉียง

รูปที่ 1 ตัวอย่างการเตรียมร่องเชื่อม

ตารางที่ 1 ลำดับการเชื่อม

วิธีการเชื่อมก้ามถอย		ความยาวสูงสุด หนึ่งตะเข็บรอย เชื่อม : 50 มม.
วิธีการเชื่อมสมนัย		
วิธีการเชื่อมเว้นระยะ		

ชั้นเชื่อมเดิม

ชั้นเชื่อมเคลือบ

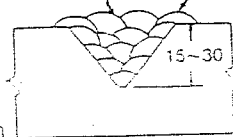
ชั้นที่ 3

ชั้นที่ 2

ชั้นที่ 1

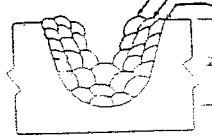
(ก)

สำหรับสิ่งบกพร่องเล็ก



(ข)

สำหรับสิ่งบกพร่องใหญ่



รูปที่ 3 วิธีการเชื่อมเคลือบ

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		การนำไปใช้งาน และลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)
	JIS	AWS		
CAN -60	Z3231 DcuAI Ni	A5.6 (EcuAI- A2)	อิเล็กทรอนิกส์ไลม์พิเศษสำหรับใช้งานเฉพาะโดยไฟ DC เนื้อโลหะรอยเชื่อมชนิดพิเศษอลูมิเนียมบอร์นซ์จะให้ความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวได้ดีและเหมาะสำหรับการเชื่อมชั้นเชื่อมด้านบนของเครื่องระบายความร้อนหรือการเชื่อมใบพัดเรือ	4.0
CS -30	Z3231 DCuSiB	A5.6 (EcuSi)	อิเล็กทรอนิกส์ไลม์พิเศษซึ่งให้เนื้อโลหะรอยเชื่อม Cu-Si-Mn เนื่องจากความสามารถในการใช้งานดีเยี่ยมเนื่องจากความสามารถในการเกาะตัวที่ดีกว่า จึงเหมาะสำหรับทองแดงหรือทองแดงเงาซึ่งมีการนำความร้อนที่สูงมาก	3.2 4.0
CP -33	Z3231 Dcu -SnA	A5.6 EcuSn -A	อิเล็กทรอนิกส์ไลม์พิเศษสำหรับการใช้งานเฉพาะโดยไฟ DC เนื้อโลหะรอยเชื่อมเป็นฟอสฟอรัสบอร์นซ์ใช้สำหรับการซ่อมชั้นเชื่อมด้านบนรองล้นและเฟือง และการเชื่อมโลหะที่ต่างชนิดกัน	3.2 4.0 5.0

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)								สมบัติทางกลโดยทั่วไป ของเนื้อโลหะรอยเชื่อม	
Cu	Si	Mn	P	Al	Fe	Ni	อื่น ๆ	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %
Bal.	0.77	1.40	-	7.38	2.50	0.50	-	630 (64)	15
Bal.	2.67	1.49	0.003	-	-	-	-	430 (44)	38
Bal.	-	-	0.09	-	-	-	Sn : 5.30	390 (40)	27



ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		การนำไปใช้งานและลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	C	Si
	JIS	AWS				
MEL-34	Z3224 DNiCu- 1	-	อิเล็กทรอนิกส์โลหะไททาเนียมสำหรับ กระแสไฟตรง การเติมลงโลหะ โมเนล (Monel) ใช้ในการเชื่อมโลหะ โมเนล โลหะที่ต่างชนิดกัน (โมเนล กับทองแดงเจือ) และการเชื่อมชั้นเชื่อม ปกคลุม	3.2 4.0 5.0	0.02	0.77
MEL-70	Z3224 DNiCu -4	A5.11 ENiCu -7	อิเล็กทรอนิกส์โลหะไททาเนียมสำหรับ กระแสไฟตรง การเติมลงโลหะ โมเนล ใช้ในการเชื่อมโลหะโมเนล และการเชื่อมชั้นเชื่อมปกคลุม	3.2 4.0 5.0	0.01	0.89
NIC-70A	Z3224 DNiCr Fe-1J	A5.11 ENiCr Fe-1	อิเล็กทรอนิกส์โลหะไททาเนียมสำหรับ กระแสไฟสลับ ใช้ในการเชื่อมอิน โคเนล (Inconel) และโลหะที่ต่างชนิด กันเช่น อินโคเนลกับเหล็กกล้าเจือต่ำ หรือเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้า เจือต่ำ มีความสามารถในการใช้งาน และความสามารถในการเชื่อมดี เนื้อ โลหะรอยเชื่อมมีความต้านทานความ ร้อน ต้านทานการกัดกร่อน และ สมบัติทางกลที่ดีเยี่ยม	2.6 3.2 4.0 5.0	0.05	0.25

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับนิเกิลและนิเกิลเจือ (การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค)

ชื่อ ผลิตภัณฑ์	มาตรฐาน		การนำไปใช้งานและลักษณะเด่น	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	C	Si
	JIS	AWS				
NIC -703D	Z3224 DNIcCr Fe-3	A5.11 ENiCr Fe-3	อิเล็กโทรดชนิดโลมสำหรับกระแส ไฟตรงใช้ในการเชื่อมอินโคเนล และ โลหะที่ต่างชนิดกันเช่นอินโคเนลกับ เหล็กกล้าเจือดำหรือเหล็กกล้าไร้สนิม กับเหล็กกล้าเจือดำมีความสามารถในการ ใช้งานและความสามารถในการ เชื่อมดีเนื้อโลหะมีความต้านทาน ความร้อน ต้านทานการกัดกร่อนและ สมบัติทางกลที่ดีเยี่ยม	3.2 4.0 5.0	0.06	0.34

อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์สำหรับนิเกิลและนิเกิลเจือ (การเชื่อมแบบปกคลุมการอาร์ค) (ต่อ)

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)							สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม			
Mn	P	S	Ni	Cr	Nb	อื่นๆ	0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kg f/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J(kgf-m)
3.26	0.003	0.002	65.02	-	1.81	Cu: Bal. Al: Ti: 0.61 Fe 1.28	340 (35)	530 (54)	56	-

สมบัติทางเคมีโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม (%)							สมบัติทางกลโดยทั่วไปของเนื้อโลหะรอยเชื่อม			
Mn	P	S	Ni	Cr	Nb	อื่นๆ	0.2%OS N/mm <sup>2</sup> (kg f/mm <sup>2</sup> )	TS N/mm <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	EI %	IV J(kgf-m)
3.73	.002	0.001	66.88	-	-	Cu: Bal. Ti: 0.57 Fe: 0.45	330 (34)	490 (50)	43	-
3.14	0.006	0.005	70.66	14.46	2.17	Fe: 9.24 Co: 0.03	390 (40)	630 (64)	42	-196 °C 93 (9.5)
6.55	0.004	0.003	69.40	13.90	1.80	Fe: 7.90 Ti: 0.01 Co: 0.03	360 (37)	620 (63)	45	-196 °C 110 (11)

# 1. การเก็บรักษาและการอบแห้งอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์

เพื่อเป็นการประกันความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์จะต้องถูกเก็บรักษาไว้อย่างดีเหมาะสมและนำมาอบแห้งใหม่ภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่แสดงอยู่ในตารางที่ 1.1 ก่อนการนำไปทำการเชื่อม เนื่องจากอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ที่เก็บรักษาไว้นานเกินไปจะดูดความชื้นไว้

ตารางที่ 1.1 ข้อเสนอแนะสภาวะเงื่อนไขการอบแห้งสำหรับอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์

สำหรับ เหล็กถลุง

ชนิดของเปลือกฟลักซ์	ชื่อผลิตภัณฑ์	ความชื้นต่ำสุด	อุณหภูมิอบแห้ง	เวลาอบแห้ง(นาที)
ชนิดอีเอ็มไนท์	B-14, B-17	3%	70-100	30-60
ชนิดเซลลูโลสสูง	KOBE-6010	6%	70-100	30-60
ชนิดไททาเนียออกไซด์สูง	RB-26	3%	70-100	30-60
ชนิดไฮโดรเจนต่ำ	LB-26, LB-52U	0.5%	300-350	30-60
ชนิดเหล็กออกไซด์ผงเหล็ก	ZERODE-27	2%	70-100	30-60

\*ปริมาณความชื้นต่ำสุดของอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ที่ถูกอบแห้ง

สำหรับเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง 50-80 กก./มม<sup>2</sup>

ชนิดของเปลือกฟลักซ์	ชื่อผลิตภัณฑ์	ความชื้นต่ำสุด	อุณหภูมิอบแห้ง	เวลาอบแห้ง(นาที)
ชนิดโลม-ไททาเนีย	LTB-50	2%	70-100	30-60
	LB-52T, LB-52 LB-52-18 LBW-52 LB-52A	0.5%	300-350	30-60
ชนิดไฮโดรเจนต่ำ	LB-62 LB-106 LB-116	-	350-400	60

\*ปริมาณความชื้นต่ำสุดของอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ที่ถูกอบแห้ง

สำหรับเหล็กกล้าใช้งานที่อุณหภูมิต่ำและเหล็กกล้าเชื่อมความร้อน

ชนิดของเปลือกปลั๊กซ์	ชื่อผลิตภัณฑ์	ความชื้นต่ำสุด	อุณหภูมิอบแห้ง	เวลาอบแห้ง(นาที)
ชนิดอิลเมไนท์	BL-70	3%	70-100	30-60
	BL-76,LB-52NS, NB-1, NB-2 NB-3N	0.5%	350-400	60
ชนิดไฮโดรเจนต่ำ	BL-96 BL-106 CMA-76 CMA-96 CMA-106 CM-5	0.5%	325-375	60

\*ปริมาณความชื้นต่ำสุดของอิเล็กโทรดหุ้มปลั๊กซ์ที่ถูกอบแห้ง

สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม

ชนิดของเปลือกปลั๊กซ์	ชื่อผลิตภัณฑ์	ความชื้นต่ำสุด	อุณหภูมิอบแห้ง	เวลาอบแห้ง(นาที)
ชนิดโลม-ไทตาเนีย	NC-XX	1%	150-200°C	30-60
ชนิดโลม-ไทตาเนีย	CR-40,CR-43	0.5%	300-350°C	30-60
ชนิดโลม	CR-40Cb CR-43Cb	0.5%	300-350°C	30-60

\*ปริมาณความชื้นต่ำสุดของอิเล็กโทรดหุ้มปลั๊กซ์ที่ถูกอบแห้ง

สำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง

ชนิดของเปลือกปลั๊กซ์	ชื่อผลิตภัณฑ์	ความชื้นต่ำสุด	อุณหภูมิอบแห้ง	เวลาอบแห้ง(นาที)
ชนิดไทตาเนียออกไซด์สูง	HF-240,HF-330	3%	70-100°C	30-60
ชนิดโลม	HF-12 HF-260,HF-350 HF-450, HF-500 HF-600 ,HF-650 HK-800K	0.5%	300-350°C	30-60

	HF-11, HF-16 MC-16	1%	150-200 °C	30-60
--	-----------------------	----	------------	-------

\*ปริมาณความชื้นต่ำสุดของอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกรอบแห้ง

สำหรับการเชื่อมเหล็กหล่อ

ชนิดของเปลือกฟลักซ์	ชื่อผลิตภัณฑ์	ความชื้นต่ำสุด	อุณหภูมิอบแห้ง	เวลาอบแห้ง(นาท)
ชนิดโลม	CIA-3	0.5%	300-350 °C	30-60
ชนิดแกรไฟต์	CIA-1, CIA-2	1.5%	70-100 °C	30-60

\*ปริมาณความชื้นต่ำสุดของอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกรอบแห้ง

สำหรับทองแดงเชื่อมและนิเกิลเชื่อม

ชนิดของเปลือกฟลักซ์	ชื่อผลิตภัณฑ์	ความชื้นต่ำสุด	อุณหภูมิอบแห้ง	เวลาอบแห้ง(นาท)
ชนิดโลม-ไททาเนีย	MEL-34, MEL-70	1%	150-200 °C	30-60
ชนิดโลม	S, NIC-70A NIC-7039	1%	200-250 °C	30-60
ชนิดโลมพิเศษ	CAN-60 CP-33, CS-30	1%	150-200 °C	30-60

\*ปริมาณความชื้นต่ำสุดของอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกรอบแห้ง

ตารางแสดงน้ำหนักลดเชื่อมต่อหุ้มฟลักซ์  
( อิเล็กโทรด )

ค่าน้ำหนักต่อหน่วยโดยประมาณของวัสดุงานเชื่อมลึนเปลือง

1. อิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์

สำหรับเหล็กตะมุน

ชื่อผลิตภัณฑ์	ขนาด (มม.)		น้ำหนัก (กรัม)
	เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความยาว	
B-17	3.2	350	31
	4.0	400	57
	5.0	400	85
B-14	3.2	400	36
	4.0	450	62
	5.0	450	97
	6.0	450	144
KOB-6010	3.2	350	25
	4.0	350	40
	4.8	350	57
RB-26	2.6	350	19
	3.2	350	29
	4.0	400	53
LB-26	3.2	350	34
	4.0	400	62
	5.0	450	106
	6.0	450	150



สำหรับเหล็กตะมุนหรือเหล็กทนแรงดึงสูง

ชื่อผลิตภัณฑ์	ขนาด (มม.)		น้ำหนัก (กรัม)
	เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความยาว	
LB-52U	3.2	400	35
	4.0	400	53
ZERODE-27	4.0	550	109
	4.5	550	134
	5.0	700	202
	5.5	700	231
	6.0	700	264
	6.4	900	380
	7.0	900	461
	8.0	900	566
LTB-50	4.0	450	76
	4.5	550	137
	5.0	700	198
	5.5	700	230
	5.5	900	296
	6.0	700	271
	6.0	900	348
	6.4	700	303
	6.4	900	390

## สำหรับเหล็กตะมูนหรือเหล็กทนแรงดึงสูง

ชื่อผลิตภัณฑ์	ขนาด (มม.)		น้ำหนัก (กรัม)
	เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความยาว	
LB-52	3.2	350	31
	4.0	400	55
	5.0	450	97
	6.0	450	135
LB-52T	3.2	350	35
	4.0	400	60
	5.0	450	96
LB-52-18	3.2	400	39
	4.0	450	69
	5.0	450	106
LB-52A	3.2	350	31
	4.0	400	55
	5.0	450	96
	6.0	450	135
LB-62	3.2	350	30
	4.0	400	54
	5.0	400	83
LB-106	3.2	350	30
	4.0	400	56
	5.0	400	85
LB-116	3.2	350	30
	4.0	400	56
	5.0	400	85

สำหรับเหล็กกล้าเจือดำที่ใช้งานในอุณหภูมิต่ำ และเหล็กกล้าเจือดำทนความร้อน

ชื่อผลิตภัณฑ์	ขนาด (มม.)		น้ำหนัก (กรัม)
	เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความยาว	
NB-1	3.2	350	31
	4.0	400	55
	5.0	400	86
LB-52NS	3.2	350	31
	4.0	400	55
	5.0	450	97
BL-76	3.2	350	30
	4.0	400	54
	5.0	450	95
CMA-76	3.2	350	30
	4.0	400	55
	5.0	400	85
CMA-106	3.2	350	30
	4.0	400	55
	5.0	400	85

## สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม

ชื่อผลิตภัณฑ์	ขนาด (มม.)		น้ำหนัก (กรัม)
	เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความยาว	
NC-38	2.6	300	20
	3.2	350	36
	4.0	350	54
NC-38L	2.6	300	20
	3.2	350	33
	4.0	350	51

## สำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง

ชื่อผลิตภัณฑ์	ขนาด (มม.)		น้ำหนัก (กรัม)
	เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความยาว	
HF-16	4.0	350	49
	5.0	350	76
HF-240	4.0	400	63
	5.0	400	98
	6.0	450	159
HF-260	4.0	400	56
	5.0	400	87
	6.0	400	141
HF-330	4.0	400	63
	5.0	400	100
	6.0	450	155
HF-350	4.0	400	58
	5.0	400	89
	6.0	450	144

สำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็ง (ต่อ)

ชื่อผลิตภัณฑ์	ขนาด (มม.)		น้ำหนัก (กรัม)
	เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความยาว	
HF-500	4.0	400	56
	5.0	400	89
	6.0	450	142
HF-600	4.0	400	61
	5.0	400	94
	6.0	450	152
HF-800K	4.0	400	92
	5.0	400	9
	6.0	450	157

สำหรับเหล็กหล่อ นิกเกิลเจือ ทองแดงเจือ

ชื่อผลิตภัณฑ์	ขนาด (มม.)		น้ำหนัก (กรัม)
	เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความยาว	
CIA-1	3.2	350	30
	4.0	350	47
CIA-2	3.2	300	26
	4.0	350	47
CIA-3	3.2	350	30
	4.0	400	53

สำหรับเหล็กหล่อ นิกเกิลเจือ ทองแดงเจือ (ต่อ)

ชื่อผลิตภัณฑ์	ขนาด (มม.)		น้ำหนัก (กรัม)
	เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความยาว	
NIC-70A	3.2	300	29
	4.0	350	54
CS-30	3.2	350	30
	4.0	400	54
CP-33	3.2	350	30
	4.0	350	48
MEL-34	3.2	350	34
	4.0	400	59

## ตารางแสดงค่าความแข็ง

## ความแข็ง

ความแข็ง วิกเกอร์ (DPH)	ความแข็งบริเนลลูกกลม 10 มม.น้ำหนัก 3000 กก.		ความแข็งร็อคเวล		ความแข็ง ของฮอร์	ค่าแรงดึง(กก.แรง/มม <sup>2</sup> ) (ค่าประมาณ)
	ลูกกลม มาตรฐาน	ลูกกลมทั้งสแตน คาร์ไบต์	สเกล-ซี	สเกล-บี		
940	-	-	-	68.0	97	-
920	-	-	-	67.5	96	-
900	-	-	-	67.0	95	-
880	-	767	-	6.4	93	-
860	-	757	-	65.9	92	-
840	-	745	-	65.3	91	-
820	-	733	-	64.7	90	-
800	-	722	-	64.0	88	-
780	-	710	-	63.3	87	-
760	-	698	-	62.5	86	-
740	-	684	-	61.8	84	-
720	-	670	-	61.0	83	-
700	-	656	-	60.1	81	-
690	-	647	-	59.7	-	-
680	-	638	-	59.2	80	-
670	-	630	-	58.8	-	-
660	-	620	-	58.3	79	-
650	-	611	-	57.8	-	-
640	-	601	-	57.3	77	-
630	-	591	-	56.8	-	-
620	-	582	-	56.3	75	-
610	-	573	-	55.7	-	-
600	-	564	-	55.2	74	-
590	-	554	-	54.7	-	210
580	-	545	-	54.1	72	206
570	-	535	-	53.6	-	202
560	-	525	-	53.0	71	199
550	505	517	-	52.3	-	194
540	496	507	-	51.7	69	190
530	488	497	-	51.1	-	186



520	480	488	-	50.5	67	183
510	473	479	-	49.8	-	179
500	465	471	-	49.1	66	174
490	456	460	-	48.4	-	169
480	448	452	-	47.7	64	165
470	441	442	-	46.9	-	160
460	433	433	-	46.1	62	156
450	425	425	-	45.3	-	153
440	415	415	-	44.5	59	149
430	405	405	-	43.6	-	144
420	397	397	-	42.7	57	140
410	388	388	-	41.8	-	136
400	379	379	-	40.8	55	131
390	369	369	-	39.8	-	127
380	360	360	(110.0)	38.8	52	123
370	350	350	-	37.7	-	120
360	341	341	(109.0)	36.6	50	115
350	331	331	-	35.5	-	112
340	3322	3322	(108.0)	34.4	47	109
330	313	313	-	33.3	-	105
320	303	303	(107.0)	32.2	45	103
310	294	294	-	31.0	-	100
300	284	284	(105.5)	29.8	42	97
295	280	280	-	29.2	-	96
290	275	275	(104.5)	28.5	41	94
285	270	270	-	27.8	-	92
280	265	265	(103.5)	27.1	40	91
275	261	261	-	26.4	-	89
270	256	256	(102.0)	25.6	38	87
265	252	252	-	24.8	-	86
260	247	247	(101.0)	24.0	37	84
255	243	243	-	23.1	-	82
250	238	238	99.5	22.2	36	81
245	233	233	-	21.3	-	79
240	228	228	98.1	20.3	34	78
230	219	219	96.7	(18.0)	33	75

220	209	209	95.0	(15.7)	32	71
210	200	200	93.4	(13.4)	30	68
200	190	190	91.5	(11.0)	29	65
190	181	181	89.5	(8.5)	28	62
180	171	171	87.1	(6.0)	26	59
170	162	162	85.0	(3.0)	25	56
160	152	152	81.7	(0.0)	24	53
150	143	143	78.7	-	22	50
140	133	133	75.0	-	21	46
130	124	124	71.2	-	20	44
120	114	114	66.7	-	-	40
110	105	105	62.3	-	-	-
100	95	95	56.2	-	-	-
95	90	90	52.0	-	-	-
90	86	86	48.0	-	-	-
85	81	81	41.0	-	-	-

ความเค้น

(lbs/in<sup>2</sup> → kgf/mm<sup>2</sup>)

Lbs/in <sup>2</sup>	0,000	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000
	(kgf/mm <sup>2</sup> )	(kgf/mm <sup>2</sup> )	(kgf/mm <sup>2</sup> )	(kgf/mm <sup>2</sup> )	(kgf/mm <sup>2</sup> )	(kgf/mm <sup>2</sup> )	(kgf/mm <sup>2</sup> )	(kgf/mm <sup>2</sup> )	(kgf/mm <sup>2</sup> )	(kgf/mm <sup>2</sup> )
0,000	0.000	0.703	1.406	2.109	2.812	3.515	4.218	4.922	5.625	6.328
10,000	7.031	7.734	8.437	9.140	9.843	10.546	11.249	11.952	12.655	13.358
20,000	14.061	14.765	15.468	16.171	16.874	17.577	18.280	18.983	19.686	20.389
30,000	21.092	21.795	22.498	23.201	23.904	24.607	25.311	26.014	26.717	27.420
40,000	28.123	28.826	29.529	30.232	30.935	31.638	32.341	33.044	33.747	34.450
50,000	35.154	35.857	36.560	37.263	37.966	38.669	39.372	40.075	40.778	41.481
60,000	42.184	42.887	43.590	44.293	44.997	45.700	46.403	47.106	47.809	48.512
70,000	49.215	49.918	50.621	51.324	52.027	52.730	53.433	54.136	54.840	55.543
80,000	56.546	56.949	57.652	58.355	59.058	59.761	60.464	61.167	61.870	62.573
90,000	63.276	63.979	64.682	65.386	66.089	66.792	67.495	68.198	68.901	69.604
100,000	70.307	71.010	71.713	72.416	73.119	73.822	74.525	75.229	75.932	76.635
110,000	77.338	78.041	78.744	79.447	80.150	80.853	81.556	82.259	82.962	83.665
120,000	84.368	85.072	85.775	86.478	87.181	87.884	88.587	89.290	89.993	90.696
130,000	91.399	92.102	92.805	93.508	94.211	94.914	95.618	96.321	97.024	97.727
140,000	98.430	99.133	99.836	100.539	101.242	101.945	102.648	103.351	104.054	104.757
150,000	105.460	106.164	106.867	107.570	108.273	108.976	109.679	110.382	111.085	111.788

160,000	112.491	113.194	113.897	114.600	115.303	116.007	116.710	117.413	118.116	118.819
170,000	119.522	120.225	120.928	121.631	122.334	123.037	123.740	124.443	125.146	125.850
180,000	126.553	127.256	127.959	128.662	129.365	130.068	130.771	131.474	132.177	132.880
190,000	133.583	134.286	134.989	135.693	136.396	137.099	137.802	138.505	139.208	139.911
200,000	140.614	141.317	142.020	142.723	143.426	144.129	144.832	145.535	146.239	146.942
210,000	147.645	148.348	149.051	149.754	150.457	151.160	151.863	152.566	153.269	153.972
220,000	154.675	155.378	156.082	156.785	157.488	158.191	158.894	159.597	160.300	161.003
230,000	161.706	162.409	163.112	163.815	164.518	165.221	165.925	166.628	167.331	168.034
240,000	168.737	169.440	170.143	170.846	171.549	172.252	172.955	173.658	174.361	175.064
250,000	175.768	176.471	177.174	177.877	178.580	179.283	179.986	180.689	181.392	182.095

Ibs/in <sup>2</sup>	100	200	300	400	500	600	700	800	900
(kgf/mm <sup>2</sup> )	0.0703	0.1406	0.2109	0.2812	0.3515	0.4218	0.4921	0.5625	0.6328

$$1 \text{ Ibs/in}^2 = 0.000703070 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\text{Ibs/in}^2 = \text{ปอนด์ / นิ้ว}^2 \text{ kgf/mm}^2 = \text{กก.แรง/มม}^2$$

### พลังงานค่ากระแทก

Ft-lbs	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ft-lbs
	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	
0	0.00	0.138	0.277	0.415	0.553	0.691	0.830	0.968	1.106	1.244	0
10	1.383	1.521	1.659	1.797	1.936	2.074	2.212	2.350	2.489	2.627	10
20	2.765	2.903	3.042	3.180	3.318	3.456	3.595	3.733	3.871	4.009	20
30	4.148	4.286	4.424	4.562	4.701	4.839	4.977	5.115	5.254	5.392	30
40	5.530	5.669	5.807	5.945	6.083	6.221	6.360	6.498	6.636	6.775	40
50	6.913	7.051	7.189	7.328	7.466	7.604	7.742	7.881	8.019	8.157	50
60	8.295	8.434	8.572	8.710	8.848	8.987	9.125	9.263	9.401	9.540	60
70	9.678	9.816	9.954	10.093	10.231	10.369	10.507	10.646	10.784	10.922	70
80	11.060	11.199	11.337	11.475	11.613	11.752	11.890	12.028	12.166	12.305	80
90	12.443	12.581	12.719	12.858	12.996	13.134	13.272	13.411	13.549	13.687	90
100	13.826	13.964	14.102	14.240	14.379	14.517	14.655	14.793	14.932	15.070	100
110	15.208	15.346	15.485	15.623	15.761	15.899	16.038	16.176	16.314	16.452	110
120	16.591	16.729	16.867	17.005	17.144	17.282	17.420	17.558	17.697	17.835	120

$$\text{Ft-lbs} = 0.138255 \text{ kgf-m}$$

$$\text{ft-lbs} = \text{ฟุต - ปอนด์ kgf-m} = \text{กก.แรง-ม.}$$

อุณหภูมิ

→ (F C)

F	C	F	C	F	C	F	C
-459.4	-273	40	4.4	170	76.7	740	3939.3
-440	-262	42	5.6	172	77.8	760	404.4
-430	-257	44	6.7	174	78.9	780	415.6
-420	-251	46	7.8	176	80.0	800	426.7
-410	-246	48	8.9	178	81.1	820	437.8
-400	-240	50	10.0	180	82.2	840	448.9
-390	-234	52	11.1	182	83.3	860	460.0
-380	-229	54	12.2	184	84.4	880	471.1
-370	-223	56	13.3	186	85.6	900	482.2
-360	-218	58	14.4	188	86.7	920	493.3
-350	-212	60	15.6	190	87.8	940	504.4
-340	-207	62	16.7	192	88.9	960	515.6
-330	-201	64	17.8	194	90.0	980	527
-320	-196	66	18.9	196	91.1	1000	538
-310	-190	68	20.0	198	92.2	1020	549
-300	-184	70	21.1	200	93.3	1040	560
-290	-179	72	22.2	202	94.4	1060	571
-280	-173	74	23.3	204	95.6	1080	582
-270	-168	76	24.4	206	96.7	1100	593
-260	-162	78	25.6	208	97.8	1120	604
-250	-157	80	26.7	210	98.9	1140	616
-240	-151	82	27.8	212	100.0	1160	627
-230	-146	84	28.9	214	101.1	1180	638
-220	-140	86	30.0	216	102.2	1200	649
-210	-134	88	31.1	218	103.3	1220	660
-200	-129	90	32.2	220	104.4	1240	671
-190	-123	92	33.3	230	110.0	1260	682
-180	-118	94	34.4	240	115.6	1280	693
-170	-112	96	35.6	250	121.1	1300	704
-160	-107	98	36.7	260	126.7	1320	716
-150	-101	100	37.8	270	132.2	1340	727
-140	-96	102	38.9	280	137.8	1360	738
-130	-90	104	40.0	290	143.3	1380	749
-120	-84	106	41.1	300	148.9	1400	760

-110	-79	108	42.2	310	154.4	1420	771
-100	-73	110	43.3	320	160.0	1440	782
-90	-68	112	44.4	330	165.6	1460	793
-80	-62	114	45.6	340	171.1	1480	804
-70	-57	116	46.7	350	176.7	1500	816
-60	-51	118	47.8	360	182.2	1520	827
-50	-45.6	120	48.9	370	187.8	1540	838
-40	-40.0	122	50.0	380	193.3	1560	849
-30	-34.4	124	51.1	390	198.9	1580	860
-20	-28.9	126	52.2	400	204.4	1600	871
-10	-23.3	128	53.3	410	210.0	1620	882
0	-17.8	130	54.4	420	215.6	1640	893
2	-16.7	132	55.6	430	221.1	1660	904
4	-15.6	134	56.7	440	226.7	1680	916
6	-14.4	136	57.8	450	232.2	1700	927
8	-13.3	138	58.9	460	237.8	1720	938
10	-12.2	140	60.0	470	243.3	1740	949
12	-11.1	142	61.1	480	248.9	1760	960
14	-10.0	144	62.2	490	254.4	1780	971
16	-8.9	146	63.3	500	260.0	1800	982
18	-7.8	148	64.4	520	271.1	1820	993
20	-6.7	150	65.6	540	282.2	1840	1004
22	-5.6	152	66.7	560	293.3	1860	1016
24	-4.4	154	67.8	580	304.4	1880	1027
26	-3.3	156	68.9	600	315.6	1900	1038
28	-2.2	158	70.0	620	326.7	1920	1049
30	-1.1	160	71.1	640	337.8	1940	1060
32	0	162	72.2	660	348.9	1960	1071
34	1.1	164	73.3	680	360.0	1980	1082
36	2.2	166	74.4	700	371.1	2000	1093
38	3.3	168	75.6	720	382.2		

$$^{\circ}F = \left( \frac{9}{5} \times ^{\circ}C \right) + 32$$

$$^{\circ}C = \frac{5}{9} (^{\circ}F - 32)$$

<sup>1</sup>F - ฟาเรนไฮต์ C = เซลเซียส

## ความยาว

เมตร	นิ้ว	ฟุต	หลา	ไมล์
1	39.3707	3.28089	1.09361	0.000621
0.025399	1	0.08333	0.02777	0.000015
0.304791	12	1	0.33333	0.000189
0.914383	36	3	1	0.000568
1609.34	63360	5280	1760	1

## น้ำหนัก

กรัม	กิโลกรัม	ออนซ์	ปอนด์	ตองตัน	ช็อตตัน
1	0.001	0.035274	0.002204	0.0000009	0.000001
1000	1	35.2739	2.20462	0.000984	0.001102
28.3495	0.028349	1	0.0625	0.000027	0.000031
453.592	0.453592	16	1	0.000446	0.0005
1016047	1016.05	35840	2240	1	1.12
907178	907.1	32000	2000	0.892857	1

## หน่วยเอสไอ ( SI )

	หน่วย		อัตราส่วน	
	ธรรมดา	SI	ธรรมดา	SI
ความเค้น	ปอนด์/นิ้ว <sup>2</sup>	นิวตัน/มม <sup>2</sup> หรือ เมกะกะพา	1	0.68947 x 10 <sup>2</sup>
	กก.แรง/มม. <sup>2</sup>	นิวตัน/มม <sup>2</sup> หรือ เมกะกะพา	1	9.80665
พลังงานค่า	ฟุต - ปอนด์	จูลย์	1	1.35582
กระแทก	กก.แรง-ม.	จูลย์	1	9.80665

## บรรณานุกรม

1. เทคโนโลยีการเชื่อมประสาน โดย ศศ. สมชัย เกาสมบัติ
2. การเชื่อมไฟฟ้าและแก๊ส โดย สมบูรณ์ เต็งหงส์เจริญ
3. INTERNATIONAL STANDARD, COVERELECTRODE FOR MANUAL ARC WELDING OF MILD STEEL AND LOW ALLOY STEEL - CODE OF SYMBOLS FOR IDENTIFICATION, 1973 -03 -01
4. Welding Process Technology โดย P I Boudcroft
5. HAWARD B. CARY WELDING LESSONS, TROY, OHIO, HOBART WELDING SCHOOL ( C 1969 )
6. การเชื่อมโลหะชนิดต่างๆ ด้วยไฟฟ้าและการเลือกใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ของ KOBE CO. LTD
7. JAMES A. PENDER, WELDING 2<sup>nd</sup> ed. CANADA, McGRAW - HILL RYERSON LIMITED ( 1978 )