

ผลของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมทิกพัลส์
เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28 นิกเกิล 7



นายธรรมา ชงทัต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF NITROGEN IN ARGON SHIELDING GAS ON MICROSTRUCTURE
OF TIG PULSE WELDS OF 28Cr-7Ni DUPLEX STAINLESS STEEL

Mr. Tara Zongthud

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

511079

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนต่อโครงสร้าง
จุลภาคของรอยเชื่อมทิกพัลส์เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มี
ส่วนผสมโครเมียม 28 นิกเกิล 7

โดย

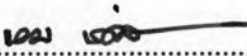
นายธรา ชงทัต

สาขาวิชา

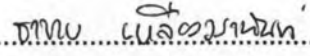
วิศวกรรมโลหการ

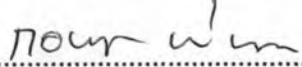
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ

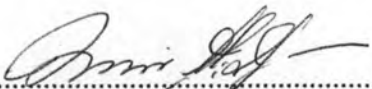
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.ธชาย เหลืองวรานันท์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา)

ธารา ชงทัด : ผลของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมทิกพัลส์
เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28 นิกเกิล 7 (EFFECT OF NITROGEN IN ARGON
SHIEDLING GAS ON MICROSTRUCTURE OF TIG PULSE WELDS OF 28Cr- 7Ni DUPLEX
STAINLESS STEE) อ. ที่ปริภาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ, 181 หน้า

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาผลของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน (1-5 เปอร์เซ็นต์
โดยปริมาตร) ต่อโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมทิกพัลส์เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม
28 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิล 7 เปอร์เซ็นต์ และไนโตรเจน 0.0018 (K1), 0.1100 (K2), 0.2300 (K3), 0.3400 (K4)
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีสภาวะการเชื่อมคือกระแสพัลส์ 140 แอมแปร์ กระแสพื้น 35 แอมแปร์ ความถี่
พัลส์ 1.5 รอบ/วินาที ความเร็วเชื่อม 4.15 มม./วินาที อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 ลิตร/นาที

การเพิ่มปริมาณไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนส่งผลเพิ่มปริมาณออกสเตไนต์ในเนื้อเชื่อม
แนวการหลอมเหลว และบริเวณกระทบร้อน ของทุกตัวอย่าง พบปริมาณออกสเตไนต์ในเนื้อเชื่อมสูงสุดใน
ตัวอย่าง K3 ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเชื่อมสูงสุด เรียงลำดับจากสูงไปต่ำของปริมาณไนโตรเจนในเนื้อ
เชื่อมเป็นดังนี้ $K3 > K4 > K2 > K1$

การเพิ่มปริมาณไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนมีผลต่อการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ (Cr_2N)
ในเนื้อเชื่อม แนวการหลอมเหลว และบริเวณกระทบร้อน ตรวจพบการตกตะกอนโครเมียมไนไตรด์ ในเนื้อ
เชื่อมของตัวอย่าง K1 และ K2 แต่ไม่พบการตกตะกอนโครเมียมไนไตรด์ในเนื้อเชื่อมของตัวอย่าง K3 และ K4
การตกตะกอนโครเมียมไนไตรด์ในแนวการหลอมเหลวของ K2 มากกว่า K4, K3 และ K1 ตามลำดับ ปริมาณ
การตกตะกอนโครเมียมไนไตรด์ในบริเวณกระทบร้อนของ K4 สูงสุด ซึ่งสูงกว่า K3 อย่างไรก็ตามพบการ
ตกตะกอนโครเมียมไนไตรด์ในบริเวณกระทบร้อนของ K2 และ K1 เล็กน้อย

ภาควิชา...วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต..... ดร. น้อย.....
สาขาวิชา...วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่ออ.ที่ปริภาวิทยานิพนธ์หลัก..... กอบบุญ.....
ปีการศึกษา.....2551.....

4870321821 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : DUPLEX STAINLESS STEEL / NITROGEN / WELDMENT /AUSTENITE /
CHROMIUM NITRIDE

TARA ZONGTHUD : EFFECT OF NITROGEN IN ARGON SHIELDING GAS ON
MICROSTRUCTURE OF TIG PUSE WELDS OF 28Cr-7Ni DUPLEX STAINLESS STEEL.
ADVISOR : ASSOC. PROF. GOBBOON LOTHONGKUM. Dr-Ing,181 pp.

The objective of this research was to study the effect of nitrogen in argon shielding gas (1-5 vol.%) on microstructure of 28Cr-7Ni-xN duplex stainless steel weldments. The nitrogen content of samples were 0.0018 wt.%(K1), 0.1100 wt.%(K2), 0.2300 wt.%(K3) and 0.3400 wt.%(K4). The conditions of TIG pulse welding were pulse currents of 140 A, base currents of 30 A, pulse frequency of 1.5 /s, welding speeds of 4.15 mm/s. The flow rate of shielding gas was 15 liters/min.

Increasing of nitrogen in argon shielding gas resulted in increasing of austenite content of weld metal, fusion line and heat effect zone of all samples. The maximum amount of austenite content in weld metal, fusion line and heat effect zone was found in K3 sample, which had the maximum of nitrogen content in weld metal. From high to low nitrogen contents of weld metal the order can be as follow; K3 > K4 > K2 > K1.

The increase of nitrogen content in argon shielding gas had also affected the Cr₂N precipitation in weld metal, fusion line and heat effect zone. Precipitation of Cr₂N in weld metal was found in sample K1 and K2, but it was not found in sample K3 and K4. Precipitation of Cr₂N in fusion line in K2 was greater than in K4, K3 and K1, respectively. The amount of Cr₂N precipitation in heat effect zone was found to be highest in K4 which was higher than in K3. However, a little precipitation of Cr₂N in heat effect zone of K2 and K1 was also found.

Department...Metallurgical Engineering..... Student's signature.....
Field of studies...Metallurgical Engineering..... Advisor's signature.....
Academic year ...2008.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบ
ของพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ ซึ่งได้กรุณาให้ความ
ช่วยเหลือและแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยด้วยดีตลอดมา ตลอดจนขอขอบพระคุณ
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ขอขอบคุณ
บริษัท Nisshin Steel Co., Ltd. และ Prof. Dr. T. Maki มหาวิทยาลัยโตเกียว ที่ให้ความอนุเคราะห์
เหล็กกล้าไร้สนิมคุณภาพดีสำหรับการวิจัยในครั้งนี้ และขอบคุณ สำนักงานโครงการสนับสนุน
งานวิจัยที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยนี้มาตลอด ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรม
โลหการทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนในด้านต่าง ๆ
ด้วยดีตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา และขอบคุณเพื่อน ๆ น้อง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็น
กำลังใจแก่ผู้วิจัยด้วยดีอย่างสม่ำเสมอ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ต
คำอธิบายอักษรย่อและสัญลักษณ์.....	พ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	2
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมดิวเพิลท์.....	3
2.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาค ที่บริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้า ไร้สนิมดิวเพิลท์.....	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.4 ความสำคัญของแก๊สไนโตรเจนต่อการศึกษาโครงสร้างจุลภาคในแนวเชื่อม ของเหล็กกล้าไร้สนิมดิวเพิลท์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	21
3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	27
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.2 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	23
4 ผลการทดลองและอภิปราย.....	31

บทที่	หน้า
4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกทัลล์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+(1-5% N ₂).....	31
4.2 ผลของไนโตรเจนต่อปริมาณโครงสร้างเฟรไรต์และออสเทนไนต์ในแนวเชื่อม ของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกทัลล์ ใช้แก๊สปกคลุม Ar+(1-5%)N ₂	89
4.3 ผลของไนโตรเจนต่อการตกตะกอนโครเมียมไนไตรต์ในแนวเชื่อมเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกทัลล์ใช้แก๊สปกคลุม Ar+(1-5%) N ₂	94
5 สรุปผลการทดลอง.....	98
รายการอ้างอิง.....	99
ภาคผนวก.....	101
ภาคผนวก ก.....	102
ภาคผนวก ข.....	105
ภาคผนวก ค.....	132
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	181

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์โดยทั่วไป.....	3
2.2	ส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่กำลังพัฒนาให้มีความต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น.....	3
2.3	สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์บางเกรด.....	4
2.4	คุณสมบัติที่เปลี่ยนไปตามปริมาณเฟอไรต์.....	5
2.5	ส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าผสมออกซิเดนิติกเกรด 310.....	8
2.6	ส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ใช้ในการทดลองของ G. Huismann และ H. Hoffmeister.....	14
3.1	ส่วนผสมเคมีโดยน้ำหนักและสัดส่วนของเฟสออสเทนไนต์ของเหล็ก K1-K4 ที่ได้รับจากบริษัท Nissin steel จำกัด.....	23
3.2	สภาวะการอบชุบความร้อนเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วชุบน้ำ เพื่อควบคุมสัดส่วนเฟสออสเทนไนต์ของเหล็ก K1-K4.....	23
3.3	ข้อแนะนำสำหรับการเลือกขนาดกริด (Grid size selection).....	29
3.4	การประมาณค่าตัวแปร n จากค่าความแม่นยำสัมพัทธ์ที่ออกแบบไว้ และจากสัดส่วนปริมาณเฟสที่สนใจ.....	30
4.1	ปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนและปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+(1-3-5%)N ₂	90
4.2	ปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนและปริมาณออสเทนไนต์ในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	91
4.3	ปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 1-5%N ₂ และปริมาณออสเทนไนต์ในแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์...	92
4.4	ปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 1-5%N ₂ และปริมาณออสเทนไนต์ในบริเวณกระแทกร้อนของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	93
4.5	ปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 1-5%N ₂ และโครเมียมไนไตรด์ในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	94

ตารางที่	หน้า
4.6 ปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 1-5%N ₂ และโครเมียมไนไตรด์ ในแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกทัลล์.....	96
4.7 ปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน1-5%N ₂ และโครเมียมไนไตรด์ ในบริเวณกระทะร้อนของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกทัลล์.....	97
ปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนและปริมาณไนโตรเจน ในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกทัลล์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+(1-3-5%) N ₂	102
ข.1 ปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนและปริมาณไนโตรเจน ในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกทัลล์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+(1-3-5%) N ₂	101
ข.2 การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเชื่อมจากสถาบันเหล็กและเหล็กกล้า....	103
ข.3 การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเชื่อมจากสถาบันเหล็กและเหล็กกล้า....	104
ก.1 ปริมาณออกซิเจน (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่โลหะพื้นของเหล็ก K1 ใช้แก๊ส ปกคลุม.....	105
ก.2 ปริมาณออกซิเจน (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่โลหะพื้นของเหล็ก K2 ใช้แก๊ส ปกคลุม.....	105
ก.3 ปริมาณออกซิเจน (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่โลหะพื้นของเหล็ก K3 ใช้แก๊ส ปกคลุม.....	106
ก.4 ปริมาณออกซิเจน (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่โลหะพื้นของเหล็ก K4 ใช้แก๊ส ปกคลุม.....	106
ก.5 ปริมาณออกซิเจน (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1 ใช้แก๊ส ปกคลุมAr+2%N ₂	107
ก.6 ปริมาณออกซิเจน (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1 ใช้แก๊ส ปกคลุมAr+3%N ₂	107
ก.7 ปริมาณออกซิเจน (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1 ใช้แก๊ส ปกคลุมAr+4%N ₂	108
ก.8 ปริมาณออกซิเจน (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1 ใช้แก๊ส ปกคลุม Ar+5%N ₂	108

ตารางที่	หน้า
ก.51 ปริมาณออกสเทไนต์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทะร้อนของ เหล็ก K4 ใช้แก๊สปกคลุม Ar+3%N ₂	130
ก.52 ปริมาณออกสเทไนต์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทะร้อนของ เหล็ก K4 ใช้แก๊สปกคลุม Ar+4%N ₂	130
ก.53 ปริมาณออกสเทไนต์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทะร้อนของ เหล็ก K4 ใช้แก๊สปกคลุม Ar+5%N ₂	131
ข.1 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1 ใช้แก๊สปกคลุม Ar+1%N ₂	132
ข.2 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1 ใช้แก๊สปกคลุมAr+2%N ₂	133
ข.3 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1 ใช้แก๊สปกคลุมAr+3%N ₂	134
ข.4 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1 Ar+4%N ₂	135
ข.5 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1 ใช้แก๊สปกคลุมAr+5%N ₂	136
ข.6 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K2 ใช้แก๊สปกคลุมAr+1%N ₂	137
ข.7 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K2 ใช้แก๊สปกคลุมAr+2%N ₂	138
ข.8 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K2 ใช้แก๊สปกคลุมAr+3%N ₂	139
ข.9 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K2 ใช้แก๊สปกคลุมAr+4%N ₂	140
ข.10 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K2 ใช้แก๊สปกคลุมAr+5%N ₂	141
ข.11 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณแนวการ หลอมเหลวของเหล็ก K1 ใช้แก๊สปกคลุมAr+2%N ₂	142

ตารางที่	หน้า
ข.40 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทบบร้อนของ เหล็ก K3 ใช้แก๊สปกคลุมAr+1%N ₂	171
ข.41 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทบบร้อนของ เหล็ก K3 ใช้แก๊สปกคลุมAr+2%N ₂	172
ข.42 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทบบร้อนของ เหล็ก K3 ใช้แก๊สปกคลุมAr+3%N ₂	173
ข.43 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทบบร้อนของ เหล็ก K3 ใช้แก๊สปกคลุมAr+4%N ₂	174
ข.44 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทบบร้อนของ เหล็ก K3 ใช้แก๊สปกคลุมAr+5%N ₂	175
ข.45 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทบบร้อนของ เหล็ก K4 ใช้แก๊สปกคลุมAr+1%N ₂	176
ข.46 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทบบร้อนของ เหล็ก K4 ใช้แก๊สปกคลุมAr+2%N ₂	177
ข.47 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทบบร้อนของ เหล็ก K4 ใช้แก๊สปกคลุมAr+3%N ₂	178
ข.48 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทบบร้อนของ เหล็ก K4 ใช้แก๊สปกคลุมAr+4%N ₂	179
ข.49 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทบบร้อนของ เหล็ก K4 ใช้แก๊สปกคลุมAr+5%N ₂	180

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ปริมาณเฟรไรต์ในบริเวณกระทะร้อน ที่อัตราการเย็นตัวต่าง ๆ Vr700 = อัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส.....	6
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างไนโตรเจนกับปริมาณเฟรไรต์ที่พบในแนวเชื่อมเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเทนิติก 316L	7
2.3	การเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนกับค่าความเค้น ตกค้างที่เพิ่มขึ้น.....	7
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนและปริมาณ ไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก 310.....	8
2.5	โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก 25Cr-7Ni-1.5Mo-xN ภายหลังจากหล่อ.....	9
2.6	ผลของไนโตรเจนต่อค่าความเค้นจุดคราก เปอร์เซ็นต์การยึดตัว และ ค่าความต้านแรงดึง.....	10
2.7	ความสัมพันธ์ของปริมาณเดลตาเฟรไรต์กับปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอย เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก.....	11
2.8	การเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สอาร์กอนกับปริมาณ ไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม.....	12
2.9	การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในแก๊สอาร์กอนกับคุณสมบัติความแข็ง	12
2.10	ปริมาณเฟรไรต์ในบริเวณกระทะร้อนที่อัตราการเย็นตัวต่าง ๆ Vr700 = อัตราการเย็นตัวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส.....	13
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อมกับปริมาณ โครเมียมไนไตรด์และปริมาณออสเทนิตที่พบ.....	14
2.12	โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทะร้อนที่ใช้เวลาการอาร์ค ๓.17 วินาทีอุณหภูมิ 1375 องศาเซลเซียส ข. 20 วินาที 1150 องศาเซลเซียส.....	16
2.13	ตะกอนโครเมียมไนไตรด์ภายในเดลตาเฟอไรท์ ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (700 องศา 5นาที่).....	17
2.14	ตะกอนโครเมียมไนไตรด์ภายในขอบเกรนย่อยเดลตาเฟอไรท์ ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (700 องศา 10นาที่).....	19

ภาพที่	หน้า
2.15 ตะกอนโครเมียมไนไตรต์ในเหล็ก K4 ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	20
3.1 วัดปริมาณโครงสร้างอสเทไนต์ด้วยวิธีการปริมาณทางโลหะวิทยา (quantitative metallography) ด้วยโปรแกรม semafore.....	27
3.2 การวัดปริมาณตะกอนโครเมียมไนไตรต์ด้วยวิธี point counting (ASTM E562).	27
3.3 ตำแหน่งการวัดค่า λ และ $(L_2)_\gamma$ จากเส้นทดสอบ.....	28
4.1 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะพื้นเหล็ก K1 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	33
4.2 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะพื้นเหล็ก K2 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	33
4.3 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะพื้นเหล็ก K3 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	34
4.4 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะพื้นเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	34
4.5 โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K1 ภายหลังการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+1% N ₂	35
4.6 โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K1 ภายหลังการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+2N ₂	35
4.7 โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K1 ภายหลังการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+3N ₂	36
4.8 โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K1 ภายหลังการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+4N ₂	36
4.9 โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K1 ภายหลังการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+4N ₂	37
4.10 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+1%N ₂	37
4.11 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+2%N ₂	38
4.12 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+3%N ₂	38
4.13 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+4%N ₂	39

ภาพที่	หน้า
4.14	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+5%N ₂ 39
4.15	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K1 ที่ผ่านการ เชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+1%N ₂ 40
4.16	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K1 ที่ผ่านการ เชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+2%N ₂ 40
4.17	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K1 ที่ผ่านการ เชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+3%N ₂ 41
4.18	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K1 ที่ผ่านการ เชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+4%N ₂ 41
4.19	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K1 ที่ผ่านการ เชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+5%N ₂ 42
4.20	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทันของเหล็ก K1 ที่ผ่านการ เชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+1%N ₂ 42
4.21	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทันของเหล็ก K1 ที่ผ่านการ เชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+2%N ₂ 43
4.22	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทันของเหล็ก K1 ที่ผ่านการ เชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+3%N ₂ 43
4.23	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทันของเหล็ก K1 ที่ผ่านการ เชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+4%N ₂ 44
4.24	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทันของเหล็ก K1 ที่ผ่านการ เชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+5%N ₂ 44
4.25	ตะกอนโครเมียมไนไตรต์ในบริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1 ถ่ายจาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด กำลังขยาย 2500 เท่า..... 45
4.26	ตะกอนโครเมียมไนไตรต์ในบริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็กK1 ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด กำลังขยาย 2500 เท่า..... 46
4.27	ตะกอนโครเมียมไนไตรต์ในบริเวณกระทันของเหล็ก K1 ถ่ายจาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด กำลังขยาย 2500 เท่า..... 47

ภาพที่	หน้า	
4.42	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K2 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+5%N ₂	55
4.43	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทันของเหล็ก K2 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+1%N ₂	55
4.44	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทันของเหล็ก K2 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+2%N ₂	56
4.45	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทันของเหล็ก K2 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+3%N ₂	56
4.46	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทันของเหล็ก K2 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+4%N ₂	57
4.47	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทันของเหล็ก K2 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+5%N ₂	57
4.48	ตะกอนโครเมียมไนไตรต์ในบริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K2 ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด กำลังขยาย 2500 เท่า.....	58
4.49	ตะกอนโครเมียมไนไตรต์ในบริเวณกระทันของเหล็ก K2 ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด กำลังขยาย 2500 เท่า.....	59
4.50	โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K3 ภายหลังการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+1%N ₂	60
4.51	โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K3 ภายหลังการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+2%N ₂	60
4.52	โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K3 ภายหลังการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+3%N ₂	61
4.53	โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K3 ภายหลังการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+4%N ₂	61
4.54	โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K3 ภายหลังการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+5%N ₂	62
4.55	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K3 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+1%N ₂	62

ภาพที่	หน้า
4.70 ตะกอนโครเมียมไนไตรต์ในบริเวณแนวการไหลของเหล็ก K3 ถ่ายจาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 2500 เท่า.....	70
4.71 ตะกอนโครเมียมไนไตรต์ในบริเวณกระทรงของเหล็ก K3 ถ่ายจาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 2500 เท่า.....	71
4.72 โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K4 ภายหลัง การเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+1%N ₂	72
4.73 โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K4 ภายหลัง การเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+2%N ₂	73
4.74 โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K4 ภายหลัง การเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+3%N ₂	73
4.75 โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K4 ภายหลัง การเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+4%N ₂	74
4.76 โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K4 ภายหลัง การเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+5%N ₂	74
4.77 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+1%N ₂	75
4.78 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+2%N ₂	75
4.79 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+3%N ₂	76
4.80 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+4%N ₂	76
4.81 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+5%N ₂	77
4.82 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวการไหลของเหล็ก K4 ที่ผ่าน การเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+1%N ₂	77
4.83 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวการไหลของเหล็ก K4 ที่ผ่าน การเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+2%N ₂	78

ภาพที่	หน้า	
4.84	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K4 ที่ผ่าน การเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+3%N ₂	78
4.85	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K4 ที่ผ่าน การเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+4%N ₂	79
4.86	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K4 ที่ผ่าน การเชื่อมทิกพัลส์โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+5%N ₂	79
4.87	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทันของเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+1%N ₂	80
4.88	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทันของเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+2%N ₂	80
4.89	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทันของเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+3%N ₂	81
4.90	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทันของเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+4%N ₂	81
4.91	โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทันของเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ โดยใช้แก๊สปกคลุม Ar+5%N ₂	82
4.92	ตะกอนโครเมียมไนไตรต์ในบริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K4 ถ่ายจาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด กำลังขยาย 2500 เท่า.....	83
4.93	ตะกอนโครเมียมไนไตรต์ในบริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K4 ถ่ายจาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด กำลังขยาย 2500 เท่า.....	84
4.94	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนและ ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	89
4.95	ความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และปริมาณ ออกซิเจนในเนื้อเชื่อม ของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	90
4.96	ความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนและปริมาณ ออกซิเจนในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	91
4.97	ความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนและปริมาณออก ซิเจนในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	92

ภาพที่	หน้า
4.98 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนและปริมาณโครเมียมไนไตรต์ในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	95
4.99 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สไนโตรเจนและปริมาณโครเมียมไนไตรต์ บริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	96
4.100 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สไนโตรเจนและปริมาณโครเมียมไนไตรต์ บริเวณกระทับร้อนของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	97

คำอธิบายอักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
$Ar+x\%N_2$	แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมด้วยไนโตรเจน ปริมาตร x เปอร์เซ็นต์โดย
BM	โลหะพื้น
WM	เนื้อเชื่อม
FL	แนวการหลอมเหลว
HAZ	บริเวณกระทบร้อน
GBA	Grain Boundary Austenite
IGA	Intergranular Austenite
WA	Widmannstatten Austenite
PTA	Partially transformed Austenite
α	โครงสร้างเฟอร์ไรต์
γ	โครงสร้างออสเทนไนต์