

ผลของพารามิเตอร์ในการเชื่อมพัลส์ทิก และส่วนผสมของก๊าซปกคลุมต่อลักษณะการเกิด  
รอยเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L  
ในลักษณะการเชื่อมที่แตกต่างกัน

นาย ประสงค์ ชะอุมไบ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

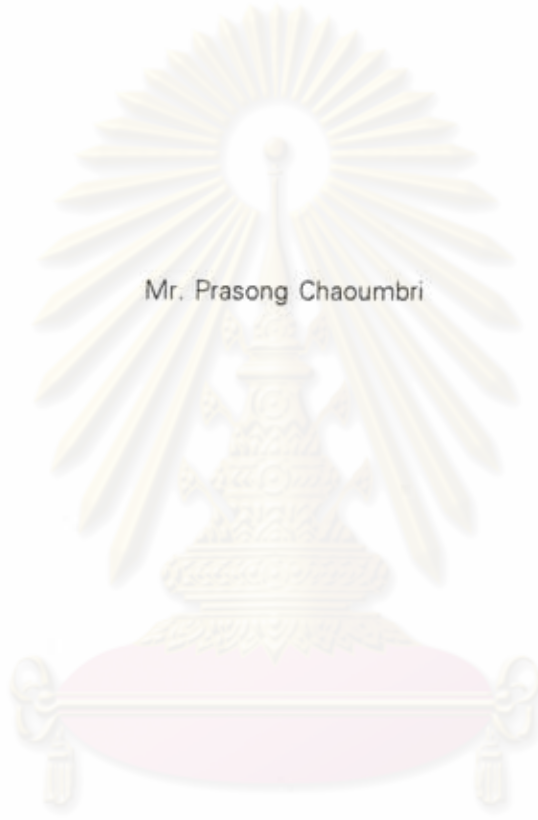
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ  
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-636-363-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF TIG PULSE PARAMETERS AND SHIELDING GAS COMPOSITIONS ON WELD  
BEAD FORMATION AND MICROSTRUCTURE OF THE 304L AUSTENITIC STAINLESS STEEL  
AT VARIOUS WELDING POSITIONS.



Mr. Prasong Chaoumbri

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of  
Engineering in Metallurgical Engineering  
Department of Metallurgical Engineering  
Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1996

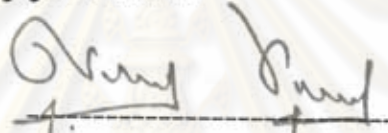
ISBN 974-636-363-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของพารามิเตอร์ในการเชื่อมพัลส์ทิก และส่วนผสมของ  
ก๊าซปกคลุมต่อลักษณะการเกิดรอยเชื่อมและโครงสร้างจุลภาค  
ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L ในลักษณะการเชื่อม  
ที่แตกต่างกัน

โดย นาย ประสงค์ ชะอุ่มใบ  
ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ


---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

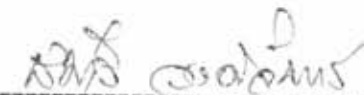
  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จัตรชัย สมศิริ)

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)

  
กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีทรรศน์ พันธุ์บรรยงก์)

  
กรรมการ  
(ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ประสงค์ ระบุ : ผลของพารามิเตอร์ในการเชื่อมพัลส์ติก และส่วนผสมของก๊าซปกคลุมต่อลักษณะการเกิดรอยเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L ในลักษณะการเชื่อมที่แตกต่างกัน (EFFECTS OF TIG PULSE PARAMETERS AND SHIELDING GAS COMPOSITIONS ON WELD BEAD FORMATION AND MICROSTRUCTURE OF THE 304L AUSTENITIC STAINLESS STEEL SHEET AT VARIOUS WELDING POSITIONS) อ. ที่ปรึกษา : ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ ; 93 หน้า. ISBN 974-636-363-8.

ศึกษาผลของตัวแปรในการเชื่อมพัลส์ติกอันประกอบด้วย ความเร็วเชื่อม กระแสไฟฟ้าพัลส์ กระแสไฟฟ้าเบส ความถี่พัลส์ และค่า % On Time ภายใต้ก๊าซปกคลุมอาร์กอน และอัตราส่วนผสมก๊าซไนโตรเจน 1, 2 และ 3% (ปริมาตร) ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่เชื่อมบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L ความหนา 3.0 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้รอยเชื่อมติดตามมาตรฐาน DIN 8563 คุณภาพชั้น AS ในลักษณะการเชื่อมแนวราบ แนวตั้ง และแนวเหนือหัว พบว่าที่ความเร็วการเชื่อม 3.4 มิลลิเมตรต่อวินาที 55% On Time ความถี่พัลส์ 1 พัลส์ต่อวินาที สามารถเชื่อมได้ในทุกลักษณะเมื่อปรับกระแสไฟฟ้าเบสและกระแสไฟฟ้าพัลส์ให้เหมาะสม รอยเชื่อมที่ได้มีความสมบูรณ์ตามมาตรฐาน โดยมีค่า w/D อยู่ระหว่าง 2.7 - 2.8 การไหลของน้ำโลหะเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกในการเชื่อมแนวตั้ง และแนวเหนือหัว เป็นสาเหตุของการเกิดรอยกินลึกด้านข้างรอยเชื่อม ทำให้เกิดขัดจำกัดในการควบคุมตัวแปรการเชื่อม เพื่อให้ได้รอยเชื่อมตามมาตรฐาน พร้อมทั้งมีระยะซึมลึกตามต้องการ และก๊าซไนโตรเจนที่ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอนมีผลต่อการลดปริมาณเคลตต้าเฟอร์ไรท์ ปริมาณไนโตรเจน 3% (ปริมาตร) ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน สามารถลดปริมาณเคลตต้าเฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหลือเพียง 12% (ปริมาตร)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... วิศวกรรมโลหการ  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมโลหการ  
ปีการศึกษา ..... 2539

ลายมือชื่อนิติ ..... *Bany L*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... *ทอง หล่อ*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

## C617884 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING  
KEY WORD:

TIG PULSE PARAMETERS / WELD BEAD FORMATION / 304L AUSTENITIC  
STAINLESS STEEL

PRASONG CHAOUMBRI : EFFECTS OF TIG PULSE PARAMETERS AND SHIELDING GAS  
COMPOSITIONS ON WELD BEAD FORMATION AND MICROSTRUCTURE OF THE 304L  
AUSTENITIC STAINLESS STEEL AT VARIOUS WELDING POSITIONS. THESIS  
ADVISOR : GOBBOON LOTHONGKUM, Dr.-Ing. 93pp. ISBN 974-636-363-8.

The effects of TIG pulse parameters such as welding speed, pulse current, base current, pulse frequency and % on time were investigated for welding of the 304L austenitic stainless steel sheet, 3 mm thickness, in flat, vertical and overhead positions, to keep the weld bead profiles in accordance with DIN 8563 quality class AS. The shielding gas used was pure argon and a mixture of argon with 1, 2 and 3% (v/v) nitrogen. The results showed that at the welding speed of 3.4 mm/sec, the pulse frequency of 1 pulse/sec and 55% on time can be used for all welding positions by adjusting the pulse and base current suitably to keep the bead contours in accordance with DIN 8563 quality class AS. The results indicated that W/D were between 2.7 - 2.8. The liquid metal in the weld pool ran down by gravitation force and an undercut occurred in both the longitudinal edges of the weld bead. There was a limitation to control the bead contours and penetration bead, to correspond to the requirements of DIN 8563 quality class AS. The nitrogen in the argon shielding gas affects the delta ferrite in weld metal's microstructure. Nitrogen mixed in argon shielding gas at 3% (v/v) reduced the delta ferrite in the weld metal's microstructure to 12% (v/v).

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา..... วิศวกรรมโลหการ

สาขาวิชา..... วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา..... 2539

ลายมือชื่อนิสิต..... Prasong Chaoumbri

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... Gobboon Lothongkum

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## กิตติกรรมประกาศ



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ก่อนอื่นผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จัทรชัย สมศิริ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีทรรศน์ พันธุ์บรรยงก์ และอาจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำชี้แนะและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยมาโดยตลอด พร้อมทั้งขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน และเนื่องจากทุนการวิจัยทั้งหมดได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ บริษัท วอลโว่ ประเทศไทย จำกัด บริษัท สยามซีเนเตอร์ จำกัด และห้างหุ้นส่วนจำกัดอรุณโลหะการ ที่ให้การสนับสนุนในด้านการสร้างเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการวิจัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

|  |    |
|--|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย .....  | ง  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....   | จ  |
| กิตติกรรมประกาศ .....  | ฉ  |
| สารบัญ .....   | ช  |
| สารบัญตาราง .....  | ฐ  |
| สารบัญรูป .....  | ณ  |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....  | ด  |
| บทที่ 1 บทนำ .....   | 1  |
| 1.1 ทัวไป .....  | 1  |
| 1.2 วัตถุประสงค์ .....   | 2  |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษา .....   | 2  |
| 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา .....   | 3  |
| บทที่ 2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น .....  | 4  |
| 2.1 มาตรฐานแนวเชื่อม DIN 8563 .....  | 4  |
| 2.2 ผลกระทบของส่วนผสมทางเคมีต่อโครงสร้างจุลภาคของ<br>เนื้อโลหะรอยเชื่อม .....    | 6  |
| 2.3 ผลกระทบของอัตราการเย็นตัวต่อโครงสร้างจุลภาคของ<br>เนื้อโลหะรอยเชื่อม .....   | 8  |
| 2.4 ผลกระทบของตัวแปรการเชื่อมต่อการเกิดจุดบกพร่องของ<br>เนื้อโลหะรอยเชื่อม ..... | 10 |
| บทที่ 3 อุปกรณ์ เครื่องมือการทดลอง และวิธีการตรวจสอบ .....                       | 13 |
| 3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือการทดลอง .....   | 13 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.1.1   | เครื่องเชื่อมไฟฟ้า .....  | 13 |
| 3.1.2   | ชุดจับยึดชิ้นงานเพื่อใช้ในการเชื่อม .....                                     | 14 |
| 3.1.3   | ปริมาณก๊าซปกคลุมและชุดควบคุมส่วนผสมก๊าซปกคลุม ....                            | 16 |
| 3.1.4   | อุปกรณ์การวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในขณะเชื่อม .....                             | 18 |
| 3.2     | การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง .....  | 18 |
| 3.3     | ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L .....                   | 18 |
| 3.4     | การตรวจสอบรอยเชื่อม .....   | 19 |
| 3.4.1   | การวัดขนาดรอยเชื่อม .....   | 19 |
| 3.4.2   | การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อม .....                          | 20 |
| 3.4.3   | การตรวจสอบจุดบกพร่องในรอยเชื่อมด้วยรังสี<br>(Radiographic Testing : RT) ..... | 20 |
| บทที่ 4 | ผลการทดลองและวิจารณ์ .....  | 22 |
| 4.1     | การเชื่อมชิ้นงานในลักษณะการเชื่อมแนวราบ .....                                 | 22 |
| 4.1.1   | การทดลองเชื่อมเบื้องต้น .....   | 22 |
| 4.1.1.1 | ผลกระทบของความเร็วการเชื่อมต่อลักษณะการเกิด<br>รอยเชื่อม .....                | 26 |
| 4.1.1.2 | ผลกระทบของความถี่พัลส์ต่อลักษณะการเกิด<br>รอยเชื่อม .....                     | 29 |
| 4.1.1.3 | ผลกระทบของ % On Time ต่อลักษณะการเกิด<br>รอยเชื่อม .....                      | 31 |
| 4.1.1.4 | ผลกระทบของกระแสไฟฟ้าเบสต่อลักษณะ<br>การเกิดรอยเชื่อม .....                    | 34 |
| 4.1.1.5 | สรุปผลกระทบของตัวแปรการเชื่อมต่าง ๆ ต่อลักษณะ<br>การเกิดรอยเชื่อม .....       | 37 |



|   |    |
|---|----|
| 4.1.2 การหาตัวแปรการเชื่อมที่ดีที่สุดในลักษณะการเชื่อมแนวราบ.....     | 37 |
| 4.1.2.1 ผลการทดลองเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วการเชื่อม                   |    |
| 3.4 มิลลิเมตรต่อวินาที .....  | 38 |
| 4.1.2.2 ผลการเชื่อมที่ความเร็วการเชื่อม 6.8 มิลลิเมตรต่อวินาที...     | 46 |
| 4.1.2.3 ผลการเชื่อมที่ความเร็วการเชื่อม 5 มิลลิเมตรต่อวินาที.....     | 50 |
| 4.1.2.4 สรุปผลการหาค่าตัวแปรการเชื่อมที่ดีที่สุด                      |    |
| ในการเชื่อมแนวราบ .....   | 52 |
| 4.2 การหาค่าตัวแปรการเชื่อมที่ดีที่สุดสำหรับการเชื่อมแนวตั้ง.....     | 52 |
| 4.2.1 ผลการทดลองเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วการเชื่อม 3.4                 |    |
| มิลลิเมตรต่อวินาที .....  | 52 |
| 4.2.2 ผลการทดลองเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วการเชื่อม 6.8                 |    |
| มิลลิเมตรต่อวินาที .....  | 61 |
| 4.2.3 ผลการทดลองเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วการเชื่อม 5                   |    |
| มิลลิเมตรต่อวินาที .....  | 62 |
| 4.2.4 สรุปผลการหาค่าตัวแปรการเชื่อมที่ดีที่สุด                        |    |
| ในการเชื่อมแนวตั้ง .....  | 63 |
| 4.3 การหาค่าตัวแปรการเชื่อมที่ดีที่สุดสำหรับการเชื่อมแนวเหนือหัว..... | 64 |
| 4.3.1 ผลการทดลองเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วการเชื่อม                     |    |
| 3.4 มิลลิเมตรต่อวินาที .....  | 64 |
| 4.3.2 ผลการทดลองเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วการเชื่อม 6.8                 |    |
| มิลลิเมตรต่อวินาที .....  | 73 |
| 4.3.3 ผลการทดลองเชื่อมชิ้นงานที่ความเร็วการเชื่อม 5                   |    |
| มิลลิเมตรต่อวินาที .....  | 74 |
| 4.3.4 สรุปผลการหาค่าตัวแปรการเชื่อมที่ดีที่สุด                        |    |
| ในการเชื่อมแนวเหนือหัว .....  | 74 |

|                       |   |    |
|-----------------------|---|----|
| 4.4                   | การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อม .....            | 77 |
| 4.5                   | การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลงานที่มีการตีพิมพ์ .....             | 80 |
| 4.6                   | ความสัมพันธ์ของตัวแปรการเชื่อมที่ได้จากการทดลอง .....             | 81 |
| บทที่ 5               | สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ .....                                | 84 |
| 5.1                   | ความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรการเชื่อมพัลส์ทิกต่อลักษณะรอยเชื่อม ..... | 84 |
| 5.1.1                 | อิทธิพลของความเร็วการเชื่อม ( $V_w$ ) .....                       | 84 |
| 5.1.2                 | อิทธิพลความถี่พัลส์ .....   | 84 |
| 5.1.3                 | อิทธิพลของ % On Time .....  | 85 |
| 5.1.4                 | อิทธิพลกระแสไฟฟ้าเบส ( $I_b$ ) .....                              | 85 |
| 5.2                   | ค่าตัวแปรการเชื่อมพัลส์ทิกที่เหมาะสม .....                        | 85 |
| 5.3                   | ผลของไนโตรเจนต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อม .....        | 86 |
| รายการอ้างอิง .....   |   | 87 |
| ภาคผนวก ก .....       |   | 88 |
| ภาคผนวก ข .....       |   | 89 |
| ภาคผนวก ค .....       |   | 91 |
| ประวัติผู้เขียน ..... |   | 93 |

# สารบัญตาราง

หน้า

|               |  |    |
|---------------|--|----|
| ตารางที่ 3.1  | ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L ตรวจสอบด้วยเครื่อง Emission Spectroscopy .....     | 19 |
| ตารางที่ 4.1  | ผลการทดลองเชื่อมชิ้นงานขึ้นต้น เพื่อหาช่วงของค่าตัวแปรที่เหมาะสมต่อการเชื่อม .....                       | 24 |
| ตารางที่ 4.2  | ขนาดของรอยเชื่อมที่ความเร็วการเชื่อมต่าง ๆ .....   | 28 |
| ตารางที่ 4.3  | ขนาดของรอยเชื่อมที่ % On Time ต่าง ๆ .....   | 33 |
| ตารางที่ 4.4  | ขนาดของรอยเชื่อมที่ค่ากระแสไฟฟ้าเบสต่าง ๆ .....  | 36 |
| ตารางที่ 4.5  | ค่าคงที่และค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมในแนวราบ ที่ความเร็วการเชื่อม 3.4 มิลลิเมตรต่อวินาที .....          | 44 |
| ตารางที่ 4.6  | ขนาดของรอยเชื่อมจากชิ้นงานทดลองของการเชื่อมในแนวราบ ที่ความเร็วการเชื่อม 3.4 มิลลิเมตรต่อวินาที .....    | 45 |
| ตารางที่ 4.7  | ค่าคงที่และค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมแนวราบ ที่ความเร็วการเชื่อม 6.8 มิลลิเมตรต่อวินาที .....            | 48 |
| ตารางที่ 4.8  | ค่าคงที่และค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมแนวราบ ที่ความเร็วการเชื่อม 5 มิลลิเมตรต่อวินาที .....              | 51 |
| ตารางที่ 4.9  | ค่าคงที่และค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมแนวตั้ง ที่ความเร็วการเชื่อม 3.4 มิลลิเมตรต่อวินาที .....           | 59 |
| ตารางที่ 4.10 | ขนาดของรอยเชื่อมจากชิ้นงานทดลองของการเชื่อมในแนวตั้ง ที่ความเร็วการเชื่อม 3.4 มิลลิเมตรต่อวินาที .....   | 60 |
| ตารางที่ 4.11 | ค่าคงที่และค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมแนวเหนือหัว ที่ความเร็วการเชื่อม 3.4 มิลลิเมตรต่อวินาที .....       | 71 |
| ตารางที่ 4.12 | ขนาดของรอยเชื่อมจากชิ้นงานทดลองของการเชื่อมแนวเหนือหัว ที่ความเร็วการเชื่อม 3.4 มิลลิเมตรต่อวินาที ..... | 72 |
| ตารางที่ 4.13 | ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อม เพื่อหาปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรท์ .....                    | 78 |

|               |  |    |
|---------------|--|----|
| ตารางที่ 4.14 | เปรียบเทียบผลการทดลองเชื่อมพัลส์ทิกเหล็กกล้าไร้สนิม 304L กับ 329.....  | 81 |
| ตารางที่ 5.1  | กระแสไฟฟ้าพัลส์และกระแสไฟฟ้าเบสของการเชื่อมพัลส์ทิกที่เหมาะสมกับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L ความหนา 3.0 มิลลิเมตร..... | 86 |



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญรูป

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 ลักษณะแนวเชื่อมตามมาตรฐาน DIN 8563 เกรด AS .....   | 6    |
| รูปที่ 2.2 แผนภูมิเชฟเฟเลอร์ (Schaeffler Diagram) แสดงผลกระทบของส่วนผสมทางเคมี<br>ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อม .....  | 8    |
| รูปที่ 2.3 ภาพตัดในแนวแกนตั้งของระบบสมดุลสามเฟสของ Fe-Cr-Ni ที่ตำแหน่ง 70% Fe....   | 9    |
| รูปที่ 2.4 กราฟแสดงตำแหน่งการเกิดจุดบกพร่องในรอยเชื่อมที่ค่าตัวแปรการเชื่อมต่าง ๆ .....   | 10   |
| รูปที่ 2.5 กราฟตัวแปรการเชื่อมพัลส์ทิกท้อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 329L (Duplex Stainless<br>Steel) ลักษณะผิวรอยเชื่อมที่ได้ ( ผลการทดลองของ G. Huismann และ<br>H. Hoffmeister ) ..... | 12   |
| รูปที่ 3.1 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง Miller/Syncrowave 350 Ampere Constant Current<br>AC/DC Arc Welding .....   | 14   |
| รูปที่ 3.2 ชุดจับยึดชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดลอง และชุดบ่อนก๊าซปกคลุมด้านล่าง.....   | 15   |
| รูปที่ 3.3 แผนภูมิการควบคุมก๊าซปกคลุมด้านบนและด้านล่างชิ้นงานทดลอง.. ..   | 17   |
| รูปที่ 3.4 การตัดชิ้นงานทดลอง เพื่อใช้ในการวัดขนาดรอยเชื่อม.....  | 21   |
| รูปที่ 4.1 การเตรียมรอยต่อแบบ Single U-Groove จากการทดลองของ G. Huismann และ<br>H. Hoffmeister .....  | 23   |
| รูปที่ 4.2 รูปแสดงรอยเชื่อมจากการทดลองเชื่อมเบื้องต้น .....   | 25   |
| รูปที่ 4.3 ตัวอย่างลักษณะรอยเชื่อมอันเกิดจากผลกระทบของความเร็วการเชื่อม .....   | 27   |
| รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง W/D, W และ D กับความเร็วในการเชื่อม $V_w$ .....  | 28   |
| รูปที่ 4.5 รอยเชื่อมอันเกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่พัลส์ .....   | 30   |
| รูปที่ 4.6 ภาพเปรียบเทียบลักษณะรอยเชื่อมที่ % On Time ต่าง ๆ .....  | 32   |
| รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างค่า W/D, W และ D กับ % On Time .....   | 33   |
| รูปที่ 4.8 ภาพตัวอย่างลักษณะรอยเชื่อมที่ค่ากระแสไฟฟ้าเบสต่าง ๆ .....  | 35   |
| รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง W/D, W และ D กับกระแสไฟฟ้าเบส.....   | 36   |
| รูปที่ 4.10 ภาพรอยเชื่อมในลักษณะการเชื่อมแนวราบ เมื่อใช้ก๊าซปกคลุมอาร์กอน.....  | 39   |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 4.11 | ภาพรอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมแนวราบ เมื่อผสมก๊าซไนโตรเจน 1% (ปริมาตร) ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน .....   | 41 |
| รูปที่ 4.12 | ภาพรอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมแนวราบ เมื่อผสมก๊าซไนโตรเจน 2% (ปริมาตร) ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน .....   | 42 |
| รูปที่ 4.13 | ภาพรอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมแนวราบ เมื่อผสมก๊าซไนโตรเจน 3% (ปริมาตร) ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน .....   | 43 |
| รูปที่ 4.14 | กราฟการเปรียบเทียบระหว่าง W/D กระแสไฟฟ้าพัลส์ที่ใช้ และผลกระทบของไนโตรเจนที่ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ของการเชื่อมแนวราบที่ความเร็วการเชื่อม 3.4 มิลลิเมตรต่อวินาที ..... | 46 |
| รูปที่ 4.15 | ภาพรอยเชื่อมที่ความเร็วการเชื่อม 6.8 มิลลิเมตรต่อวินาที .....  | 47 |
| รูปที่ 4.16 | รอยเชื่อมในลักษณะการเชื่อมแนวราบ ที่ความเร็วการเชื่อม 6.8 มิลลิเมตรต่อวินาที .....   | 49 |
| รูปที่ 4.17 | ภาพรอยเชื่อมที่ความเร็วการเชื่อม 5 มิลลิเมตรต่อวินาที .....  | 50 |
| รูปที่ 4.18 | รอยเชื่อมในลักษณะการเชื่อมแนวราบ ที่ความเร็วการเชื่อม 5 มิลลิเมตรต่อวินาที .....   | 51 |
| รูปที่ 4.19 | รอยเชื่อมในลักษณะการเชื่อมแนวตั้ง เมื่อใช้ก๊าซปกคลุมอาร์กอน .....  | 54 |
| รูปที่ 4.20 | รอยเชื่อมในลักษณะการเชื่อมแนวตั้ง เมื่อผสมก๊าซไนโตรเจน 1% (ปริมาตร) ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน .....  | 56 |
| รูปที่ 4.21 | รอยเชื่อมในลักษณะการเชื่อมแนวตั้ง เมื่อผสมก๊าซไนโตรเจน 2% (ปริมาตร) ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน .....  | 57 |
| รูปที่ 4.22 | รอยเชื่อมในลักษณะการเชื่อมแนวตั้ง เมื่อผสมก๊าซไนโตรเจน 3% (ปริมาตร) ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน .....  | 58 |
| รูปที่ 4.23 | กราฟการเปรียบเทียบระหว่าง W/D กระแสไฟฟ้าพัลส์ที่ใช้ และผลของไนโตรเจนที่ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอนของการเชื่อมแนวตั้ง .....   | 61 |
| รูปที่ 4.24 | ภาพรอยเชื่อมจากการเชื่อมในแนวตั้ง ที่ความเร็วการเชื่อม 6.8 มิลลิเมตรต่อวินาที .....  | 62 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 4.25 | รอยเชื่อมจากการเชื่อมในแนวตั้ง ที่ความเร็วการเชื่อม 5 มิลลิเมตรต่อวินาที.....  | 63 |
| รูปที่ 4.26 | ภาพรอยเชื่อมในลักษณะการเชื่อมแนวเหนือหัว เมื่อใช้ก๊าซปกคลุมอาร์กอน.....  | 66 |
| รูปที่ 4.27 | ภาพรอยเชื่อมในลักษณะการเชื่อมแนวเหนือหัว เมื่อผสมก๊าซไนโตรเจน 1%<br>โดยปริมาตร ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน .....   | 68 |
| รูปที่ 4.28 | ภาพรอยเชื่อมในลักษณะการเชื่อมแนวเหนือหัว เมื่อผสมก๊าซไนโตรเจน 2%<br>โดยปริมาตร ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน .....   | 69 |
| รูปที่ 4.29 | ภาพรอยเชื่อมในลักษณะการเชื่อมแนวเหนือหัว เมื่อผสมก๊าซไนโตรเจน 3%<br>โดยปริมาตร ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน .....   | 70 |
| รูปที่ 4.30 | กราฟการเปรียบเทียบระหว่าง W/D, กระแสไฟฟ้าพัลส์ที่ใช้ และผลของ<br>ไนโตรเจนที่ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอนของการเชื่อมแนวเหนือหัว ที่ความเร็ว<br>3.4 มิลลิเมตรต่อวินาที .....  | 73 |
| รูปที่ 4.31 | ภาพรอยเชื่อมที่ความเร็วการเชื่อม 6.8 มิลลิเมตรต่อวินาที .....  | 75 |
| รูปที่ 4.32 | ภาพรอยเชื่อมที่ความเร็วการเชื่อม 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความถี่พัลส์ 1.5 พัลส์<br>ต่อวินาที .....   | 76 |
| รูปที่ 4.33 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง % $\delta$ -Ferrite ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม กับ % $N_2$ ที่<br>ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอน .....   | 78 |
| รูปที่ 4.34 | เดลต้าเฟอร์ไรท์ในโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อม ที่ % $N_2$ ในก๊าซ<br>ปกคลุมอาร์กอนต่าง ๆ .....  | 79 |
| รูปที่ 4.35 | เปรียบเทียบผลการทดลองตัวแปรการเชื่อมพัลส์ทิกเหล็กกล้าไร้สนิม<br>ออสเทนนิติกเกรด 304L ในลักษณะการเชื่อมแนวราบ แนวตั้ง และแนวเหนือหัว<br>กับผลงานของ V.P. Kujanpaa ..... | 80 |
| รูปที่ 4.36 | กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมกับความเร็วการเชื่อม ในลักษณะ<br>การเชื่อมแนวราบ แนวตั้ง และแนวเหนือหัว .....  | 82 |
| รูปที่ 4.37 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าพัลส์ กระแสไฟฟ้าเบส กับ<br>ลักษณะการเชื่อมต่าง ๆ .....  | 83 |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

|              |                                    |
|--------------|------------------------------------|
| $\Delta a_1$ | Excess Weld Metal                  |
| $\Delta a_2$ | Incompletely Filled Groove         |
| $\Delta a_3$ | Excessive Penetration              |
| D            | ระยะเชื่อมลึก                      |
| ECr          | Chromium Equivalent                |
| ENi          | Nickel Equivalent                  |
| e            | Undercut                           |
| f            | ความถี่พัลส์                       |
| $I_p$        | กระแสไฟฟ้าพัลส์                    |
| $I_b$        | กระแสไฟฟ้าเบส                      |
| RT           | Radiographic Testing               |
| $t_b$        | Base Current Time                  |
| $t_p$        | Pulse Current Time                 |
| $U_p$        | แรงเคลื่อนไฟฟ้า, โวลท์             |
| $V_w$        | ความเร็วการเชื่อม                  |
| W/D          | ความกว้างรอยเชื่อมต่อระยะเชื่อมลึก |
| W            | ความกว้างรอยเชื่อม                 |

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย