

- ชื่องานวิจัย** : การศึกษาตัวแปรการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบบลิ่งค์ต่อการยึดตัวของรอยต่อชนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี เกรด SGACD
- ชื่อผู้วิจัย** : ผศ.ไพฑูรย์ ประทีปสุข  
ผศ.ไพบุลย์ เข้มผื่อน  
ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์
- หน่วยงาน** : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- ปี พ.ศ.** : 2554

### บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรในการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบบลิ่งค์ โดยศึกษาการยึดตัวของรอยต่อชนแนวเชื่อมของเหล็ก SGACD การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนแนวเชื่อมและการยึดตัวได้ใช้วิธีการทดสอบแบบอิริทเซน

วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาเป็นเหล็กเคลือบสังกะสีเกรด SGACD 45/45 ความหนา 0.7 มม. และ 1.2 มม. ขนาดของแผ่นเหล็กความหนา 0.7 มม. ถูกตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 1050 มม. และยาว 1680 มม. ส่วนขนาดของแผ่นเหล็กความหนา 1.2 มม. ถูกตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 280 มม. และยาว 1660 มม. รอยต่อชนของแผ่นเหล็กทั้ง 2 ถูกเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์แบบ Nd:YAG โดยมีตัวแปรของการเชื่อมคือ ความเร็วในการเชื่อมอยู่ที่ 4000 - 6000 มม.ต่อนาที ตำแหน่งหัวเชื่อมอยู่ที่ 0.45 - 0.55 มม. และระยะห่างระหว่างแผ่นชิ้นงานอยู่ที่ 0.00 - 0.13 มม. แนวเชื่อมที่ถูกเชื่อมแล้วจะถูกทดสอบการขึ้นรูปด้วยเครื่องอิริทเซนและถูกวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรมอะโนว่า (Anova)

ผลของการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้ ผลการทดสอบการขึ้นรูปโดยเครื่องอิริทเซน ความสูงของการขึ้นรูปมากกว่า 7.00 มม. ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมรับในอุตสาหกรรมรถยนต์ ตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมได้แก่ ความเร็วของการเชื่อมอยู่ที่ 4000 มม.ต่อนาที ตำแหน่งหัวเชื่อมอยู่ที่ 0.45 มม. และระยะห่างระหว่างแผ่นชิ้นงานอยู่ที่ 0.00 มม. โดยการยึดตัวอยู่ที่ 9.98 มม. การเพิ่มตำแหน่งของหัวเชื่อมจะทำให้การยึดตัวของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มระยะการซึมลึกของการเชื่อม ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ การเพิ่มความเร็วการเชื่อมและการเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นชิ้นงาน จะมีผลโดยตรงต่อการลดลงของการยึดตัว เพราะจะทำให้แนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ และทำให้เกิดปัญหา อันเดอร์ฟิลที่แนวเชื่อม

**คำสำคัญ** : การเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบบลิ่งค์ ; การเชื่อมเลเซอร์Nd:YAG ; การทดสอบวิธีอิริทเซน ; เหล็กเคลือบสังกะสีเกรด SGACD 45/45 ; การผลิตประตูรถยนต์

- Research Title** : A Study of Tailored Blank Laser Welding Parameters on Elongation of SGACD Gavanized Steel Joint
- Researcher** : Assist.Prof. Paitoon Prateepsuk  
Assist.Prof. Paiboon Yampuern  
Mr.Kittipong Kimapong (Ph.D.)
- Organization** : Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
- Year of Achievement** : 2010

### Abstract

This thesis was conducted to study an effect of Tailor blank laser welding parameters on an elongation property of a SGACD steel butt joint. A comparative between a microstructure of the butt joint and an elongation that was tested by the Erichsen test was also performed.

The 0.7 mm. and 1.2 mm thicknesses of SGACD 45/45 galvanized steel plates were a material used in this study. The dimension of 0.7 mm in thickness plate was prepared to be a rectangular shape with 1050 mm wide and 1680 mm long. The dimension of 1.2 mm in thickness plate was also prepared to be a rectangular shape with 280 mm wide and 1660 mm long. The butt joint of 2 plates was Nd: YAG laser welded by the welding parameters that were a welding speed of 4000-5000 mm/min, a target position of 0.45-0.55 mm. and a gap distance of 0.00-0.13 mm. The joint that was successfully welded was Erichsen Cupping tested and then analyzed by ANOVA software.

The experiment results were concluded as follows. The Erichsen cupping test results of the joints in this study were higher than that of 7.00 mm and were higher than that of the accepted standard in an automobile industry. The optimum parameter was a welding speed of 4000 mm/min, s target position of 0.45 mm and a gap distance of 0.0 mm with a elongation of 9.98 mm. Increasing of the target position could increase the joint elongation because it could increase the penetration distance of the joint that was an important factor for the metal deforming process. Increasing speed welding and the gap distance between the plates of the joint directly decreased the joint elongation because it produced an incomplete joint and produced the under-fill defect on the welded surface.

**Key words** ; Tailored blank laser welding ; Laser welding Nd:YAG ; Erichsen Cupping test ; Galvanized steel grade SGACD 45/45 ; door automobile production .

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย ประจำปี 2554 ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สามารถดำเนินการและบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการโลหะวิทยา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัย เทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ทำให้การทดลองนี้เสร็จสมบูรณ์ เป็นไปอย่างราบรื่น

ขอขอบคุณ คุณธรรมบุญ อินทรพล และคุณขงยุทธ ขุนอาจ ที่ให้ความช่วยเหลือในการ ควบคุมเครื่องเชื่อมเลเซอร์สำหรับการเชื่อมชิ้นงานทำการทดลอง งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตาม จุดประสงค์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอนจนทำให้ ผู้วิจัยมีโอกาสในการทำวิจัยนี้นอกจากนั้นขอกราบขอบพระคุณทุกๆท่านที่มีความเกี่ยวข้องกับ งานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งผู้วิจัยไม่ได้เอ่ยนามถึง ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอมอบแต่ทุกท่านที่ ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ศศ.ไพฑูริย์ ประทีปสุข  
ศศ.ไพฑูริย์ เข้มเฟื่อน  
ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย   | ก    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ  | ข    |
| กิตติกรรมประกาศ   | ค    |
| สารบัญ  | ง    |
| สารบัญตาราง   | ฉ    |
| สารบัญรูป   | ช    |
| บทที่ 1 บทนำ  | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา                        | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย                                  | 2    |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัยและตัวแปร                               | 3    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                             | 3    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                     | 4    |
| 2.1 เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี                                | 4    |
| 2.2 รอยต่อชนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี                        | 6    |
| 2.3 ทฤษฎีการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์เบดลิงค์                  | 6    |
| 2.4 การทดสอบและตรวจสอบสมบัติของแนวเชื่อม                  | 17   |
| 2.5 ทฤษฎีการประเมินทางสถิติ                               | 21   |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                                 | 28   |
| บทที่ 3 การดำเนินงานการวิจัย                              | 31   |
| 3.1 ลำดับขั้นตอนวิธีการวิจัย                              | 31   |
| 3.2 การออกแบบลำดับขั้นการทดลองการทดลอง                    | 47   |
| 3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน                               | 52   |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล                      | 53   |
| 4.1 การทดลองเบื้องต้น                                     | 53   |
| 4.2 ผลการทดสอบอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อม                 | 59   |
| 4.3 การวิเคราะห์ตัวแปรการเชื่อมต่อค่าการยึดตัวด้วยอะโนว่า | 73   |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ                 | 78   |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง                                  | 78   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ                                      | 79   |
| บรรณานุกรม  | 80   |
| ภาคผนวก ก ค่าการยึดตัวและรูปจากการทดลอง             | 82   |
| ภาคผนวก ข ตารางบันทึกค่าการยึดตัวลงในโปรแกรมมินิเทป | 110  |
| ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์                              | 117  |

สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 เกรดและสัญลักษณ์สำหรับเหล็กรีดร้อนประเภทเหล็กแผ่นและเหล็กม้วน                   | 4    |
| 2.2 เกรดและสัญลักษณ์สำหรับเหล็กรีดเย็นประเภทเหล็กแผ่นและเหล็กม้วน                   | 5    |
| 2.3 แบบพารามิเตอร์  | 23   |
| 2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแบบจำลอง 3 ปัจจัย แบบผลตายตัว(Fixed effect)        | 26   |
| 3.1 ขั้นตอนการวิจัย   | 31   |
| 3.2 ส่วนผสมทางเคมี  | 32   |
| 3.3 สมบัติทางกลความแข็งแรงดึง   | 34   |
| 3.4 แผนผังการสุ่มการทดลอง   | 48   |
| 4.1 ผลการทดลองการยืดตัวของแนวเชื่อมการทดลองความเร็วการเชื่อม 6000 มม.ต่อนาที        | 54   |
| 4.2 ผลการทดลองการยืดตัวของแนวเชื่อมการทดลองความเร็วการเชื่อม 4000 มม.ต่อนาที        | 56   |
| 4.3 ค่าเฉลี่ยการวัดมิติรอยเชื่อมเลเซอร์ความเร็วระยะตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 มม.      | 60   |
| 4.4 ค่าการยืดตัวจากการทดลอง   | 61   |
| 4.5 ค่าเฉลี่ยการวัดมิติรอยเชื่อมเลเซอร์ที่ระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0.00 0.07 0.15 มม.  | 65   |
| 4.6 ค่าเฉลี่ยการวัดมิติรอยเชื่อมเลเซอร์ที่ความเร็ว 4000 5000 6000 มม.ต่อนาที        | 69   |
| 4.7 ค่าเฉลี่ยการวัดมิติรอยเชื่อมเลเซอร์ที่ตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 + 0.50 + 0.55 มม. | 72   |
| 4.8 การวิเคราะห์ห้อยโนว่า (Anova analysis) ต่อค่าการยืดตัว (Elongation)             | 74   |

## สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า  |    |
|--------|---|----|
| 1.1    | ผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนประตูลอยนต   | 1  |
| 1.2    | ชิ้นงานที่มีความหนาและความกว้างต่างกัน                              | 2  |
| 2.1    | Nd: YAG เลเซอร์ขนาด 3 กิโลวัตต์                                     | 7  |
| 2.2    | เครื่องผลิตลำแสงเลเซอร์   | 8  |
| 2.3    | เครื่องถ่ายเทความร้อน   | 9  |
| 2.4    | การเคลื่อนที่หัวเชื่อม  | 9  |
| 2.5    | การตรวจสอบความหนา   | 10 |
| 2.6    | นำชิ้นงานวางที่โต๊ะเชื่อม   | 10 |
| 2.7    | นำชิ้นงานออกจากที่โต๊ะเชื่อม  | 11 |
| 2.8    | การปล่อยลำแสง   | 11 |
| 2.9    | การควบคุมการทำงาน   | 12 |
| 2.10   | ชุดรับข้อมูลและสั่งการ  | 12 |
| 2.11   | วางชิ้นงานที่ตรวจสอบความหนาแล้ว                                     | 13 |
| 2.12   | โต๊ะวางชิ้นงานก่อนตรวจสอบความหนา                                    | 13 |
| 2.13   | แผนภาพของNd: YAG เลเซอร์  | 14 |
| 2.14   | แผ่นเทอร์เบอแล็งค์  | 15 |
| 2.15   | การเชื่อมรอยต่อชนด้วยเลเซอร์  | 16 |
| 2.16   | การเชื่อมรอยต่อแยกด้วยความต้านทาน                                   | 16 |
| 2.17   | การเชื่อมแบบการเหนี่ยวนำความถี่สูง                                  | 17 |
| 2.18   | การเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน   | 17 |
| 2.19   | เครื่องทดสอบอริเซน  | 18 |
| 2.20   | ขนาดชิ้นงานทดสอบค่าการยึดตัว  | 18 |
| 2.21   | ผลการทดสอบค่าการยึดตัว  | 19 |
| 2.22   | แสดง โครงสร้างทางสถิติที่นิยมใช้ในปัจจุบัน                          | 22 |
| 2.23   | แสดง ค่าวิกฤติ พื้นที่วิกฤติ ระดับนัยสำคัญ และค่าพี- แวลู (P-value) | 24 |
| 2.24   | พื้นที่ใต้โค้งด้านขวาการแจกแจงเอฟ                                   | 26 |
| 3.1    | ขนาดชิ้นงานตัด  | 32 |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า                                     |    |
|--------|--|----|
| 3.2    | การทดสอบความแข็งแรงดึง                   | 33 |
| 3.3    | การเตรียมชิ้นงานที่ตัดเสร็จก่อนการเชื่อม | 33 |
| 3.4    | โต๊ะสำหรับวางชิ้นงานก่อนวัดความหนา       | 34 |
| 3.5    | กดปุ่มสวิตช์ สตาร์ท                      | 35 |
| 3.6    | นำชิ้นงานเข้าตรวจสอบความหนา              | 36 |
| 3.7    | ตรวจสอบความหนาที่โต๊ะตรวจสอบ             | 37 |
| 3.8    | ชิ้นงานที่ ตรวจสอบความหนาแล้ว            | 37 |
| 3.9    | นำชิ้นงานวางบนจิ๊กเชื่อม                 | 38 |
| 3.10   | ทำความสะอาดขอบชิ้นงาน                    | 38 |
| 3.11   | ทำความสะอาดจิ๊กเชื่อม                    | 39 |
| 3.12   | ทำความสะอาดร่องตัวคั่นชิ้นงาน            | 40 |
| 3.13   | ตรวจตำแหน่ง Pusher                       | 40 |
| 3.14   | ทำความสะอาดโฟกัสเลนส์                    | 41 |
| 3.15   | ตรวจพลังงานเลเซอร์                       | 41 |
| 3.16   | ตรวจแรงดันลม                             | 42 |
| 3.17   | การต่อชนในอุปกรณ์การจับยึด               | 42 |
| 3.18   | รีโมทคอนโทรลความเร็ว                     | 43 |
| 3.19   | การปรับตำแหน่งหัวเชื่อม                  | 44 |
| 3.20   | ตำแหน่งหัวเชื่อมเคลื่อนที่               | 44 |
| 3.21   | ชิ้นงานเตรียมตรวจสอบโครงสร้างมหภาค       | 45 |
| 3.22   | ชิ้นงานที่ตัดเสร็จเตรียมไปทดสอบ          | 46 |
| 3.23   | เครื่องตัด ชิ้นงานทดสอบ                  | 47 |
| 3.24   | เครื่องมือทดสอบการยึดตัว                 | 49 |
| 3.25   | การทดสอบการยึดตัวของแนวเชื่อม            | 49 |
| 3.26   | กระจกส่องแนวเชื่อมเครื่องทดสอบการยึดตัว  | 50 |
| 3.27   | สเกลวัดค่าการยึดเครื่องทดสอบการยึด       | 50 |
| 3.28   | เครื่องทดสอบการยึดตัวอิริเซน             | 51 |
| 3.29   | การทดสอบการยึดตัวของแนวเชื่อม            | 52 |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดหัวเชื่อมกับระยะห่างแผ่นงานเชื่อมและค่าการยึดตัว | 55   |
| 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างแผ่นตำแหน่งหัวเชื่อมกับค่าการยึดตัว                | 57   |
| 4.3 ขนาดมิติของรอยต่อต่างๆบริเวณแนวเชื่อม   | 60   |
| 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างแผ่นงานเชื่อมกับตำแหน่งการวัดค่า                   | 61   |
| 4.5 ชิ้นงานหลังการทดสอบการยึดตัว  | 63   |
| 4.6 ระยะห่างแผ่นงานเชื่อมกับค่าการยึดตัว  | 63   |
| 4.7 โครงสร้างมหภาคของระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0.00 0.07 0.13 มม.                         | 64   |
| 4.8 ความเร็วการเชื่อมกับค่าการยึดตัว  | 64   |
| 4.9 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อรอยต่อที่ความเร็วการเชื่อม 4000 5000 6000มม.ต่อนาที        | 65   |
| 4.10 ตำแหน่งหัวเชื่อมกับค่าการยึดตัว  | 66   |
| 4.11 โครงสร้างมหภาคของตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 + 0.50 + 0.55 มม.                       | 67   |
| 4.12 อิทธิพลร่วม ระหว่างความเร็วและตำแหน่งหัวเชื่อม                                   | 68   |
| 4.13 อิทธิพลร่วม ระหว่างความเร็วและ ระยะห่างของแผ่นงาน                                | 68   |
| 4.14 อิทธิพลร่วมระหว่างตำแหน่งหัวเชื่อมและระยะห่างแผ่นงานเชื่อม                       | 70   |
| 4.15 โครงสร้างสภาคตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 มม.   | 71   |
| 4.16 โครงสร้างมหภาคตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.50 มม.  | 71   |
| 4.17 โครงสร้างมหภาคตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.55 มม.  | 72   |
| 4.18 อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วและตำแหน่งหัวเชื่อม                                    | 75   |
| 4.19 อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วระยะห่างแผ่นงานเชื่อม                                  | 76   |
| 4.20 อิทธิพลร่วมระหว่างตำแหน่งหัวเชื่อมและระยะห่างแผ่นงานเชื่อม                       | 76   |