

อิทธิพลของตัวแปรความเร็วรอบการเชื่อมเสียดทานแบบกวนรอยต่อชนแผ่นเทเลอร์แบบลิ้งค์
อลูมิเนียมผสม AA6063

**Influence of Parameters on the Friction Stir Welding of AA6063
Aluminum Alloy Tailored Blank Butt Joint**

เจษฎา แก้ววิชิต* และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต – นครนายก ตำบลคลองหก
อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 E-mail:jesada.kt@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรความเร็วรอบการเชื่อมเสียดทานแบบกวนรอยต่อชนแผ่นเทเลอร์แบบลิ้งค์อลูมิเนียมผสม AA6063 ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การลดความเร็วรอบและการเพิ่มความเร็วเดินแนวมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนและทำให้เกิดผิวแนวเชื่อมที่ราบเรียบและไม่มีครีบกั้นการเพิ่มความเร็วรอบในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนทำให้ความแข็งแรงดึงของรอยต่อมีค่าลดลงและทำให้ผิวหน้าแนวเชื่อมมีความหยาบและเกิดครีบริ้วไม่สม่ำเสมอขึ้นสภาวะการเชื่อมที่ทำให้เกิดค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดประมาณ 182MPa คือความเร็วรอบที่ 200 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125mm/min โครงสร้างมหภาคจุลภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนแบบทรงกระบอกมีความสมบูรณ์ และบริเวณแนวเชื่อมเกิดการก่อตัวของเกรนใหม่มีขนาดเม็ดเกรนประมาณ 7.75 ไมครอนเล็กและกลมมนกว่าโลหะเดิม

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานแบบกวน เทเลอร์แบบลิ้งค์ รอยต่อชน

Abstract

This research aims to determine the properties of Friction Stir Welding (FSW) rotating speeds on AA6063 aluminum alloy tailored blank butt joint. The experimental results are summarized as follows. By decreasing the rotating speed and increasing the traversing speed of the FSW, the tensile strength of the butt joint increased, resulting in a smooth welding surface with no fin splash. The increase of the rotating speed also directly decreased the tensile strength of the butt joint and produced rough welding surfaces. An optimum condition that produced the tensile strength of 182 MPa was a rotating speed of 200 rpm, a welding speed of 125 mm/min and an unthread stirrer. The macrostructure and microstructure of the joint interface welded by an unthread stirrer produced a sound welds and a new grain size that was smaller and rounder than that of the base metal.

Keywords: Friction Stir Welding, tailored blank, butt joints

1. บทนำ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) ซึ่งเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) ที่มีการใช้เครื่องมือที่แยกต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย (Conventional Fusion Welding) (Thomas et al., 1991) ได้นำเอาความรู้ทางด้านเทคโนโลยีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมาใช้ในงานอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ การผลิตเรือเดินสมุทร การผลิตเครื่องบิน (Thomas and Nicholas, 1997) และในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ได้นำอลูมิเนียมมาแทนที่ชิ้นส่วนที่ทำมาจากเหล็ก เช่น โครมและตัวถังรถยนต์โดยวัสดุที่นำมาใช้เชื่อมเป็นวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกัน หรือวัสดุชนิดเดียวกันแต่ความหนาของวัสดุต่างกันมาเชื่อมประกอบกัน แต่ความแข็งแรงของวัสดุใกล้เคียงกับวัสดุเดิม (ธรรมบุญ อินทรพล, 2551) เรียกว่า “เทเลอร์แบงก์ (Tailored Bank)” จุดประสงค์เพื่อลดต้นทุนในการผลิต ลดค่าใช้จ่ายในการผลิต ลดน้ำหนักของโครงสร้างโดยรวม การเชื่อมวัสดุเทเลอร์แบงก์นั้นมีความยากลำบาก เนื่องจากวัสดุมีการถ่ายเทความร้อนแตกต่างกัน (ธรรมบุญ อินทรพล, 2551) จึงทำให้กระบวนการเชื่อมได้รับความสนใจในการพัฒนาการเชื่อมที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้ FSW ในการเชื่อมอลูมิเนียมเกรดต่างๆ ด้วยตัวกวนรูปร่างต่างๆ มากมายและการศึกษาเหล่านี้ได้รายงานความแข็งแรงของรอยต่อชนมีค่าสูงมากกว่าอลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุหลักในงานเชื่อม (วิชัย พุ่มจันทร์, 2552) และเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายก่อให้เกิดข้อบกพร่องในเนื้อวัสดุหลังการเชื่อม (ธงชัย เครือผือ, 2551)

ด้วยเหตุนี้การวิจัยจึงมีจุดมุ่งหมายในการศึกษาความเป็นไปได้ของตัวแปรการเชื่อมเสียดทานแบบกวน รอยต่อชนแผ่นเทเลอร์แบงก์อลูมิเนียมผสม AA6063 โดยทำการศึกษาอัตราตัวแปรความเร็วรอบที่ 200, 500

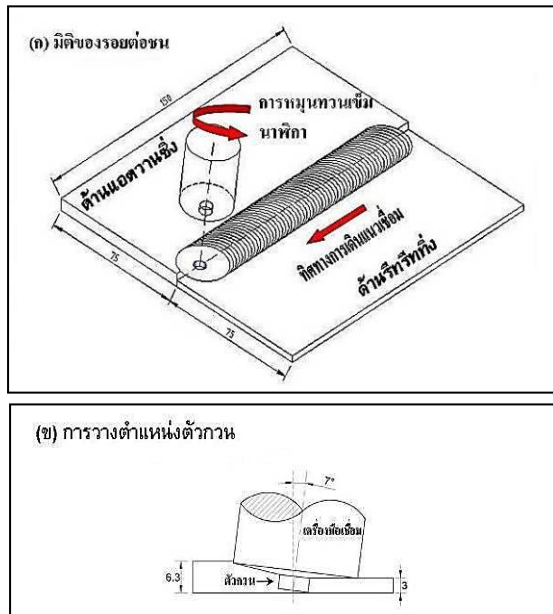
1000 rpm โดยใช้อัตราความเร็วเดินแนวเชื่อมที่กำหนด 25, 50, 80, 100 และ 125 mm/min และตัวกวนเป็นแบบทรงกระบอกเอียง 2 องศา (วิชัย พุ่มจันทร์, 2555)

2. วัตถุประสงค์

1. ศึกษาตัวแปรความเร็วรอบการเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนแผ่นเทเลอร์แบงก์อลูมิเนียมผสม AA6063
2. ศึกษาตัวแปรความเร็วรอบการเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยต่อชนแผ่นเทเลอร์แบงก์อลูมิเนียมผสม AA6063

3. อุปกรณ์และวิธีการ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรความเร็วรอบและความเร็วเดินแนวเชื่อมในการรับแรงดึงของแนวเชื่อมอลูมิเนียมที่มีขนาดต่างกันโดยต่อชนด้วยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานซึ่งจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าอัตราความเร็วรอบในการหมุนและอัตราความเร็วเดินแนวเชื่อมมีผลเป็นอย่างมากต่อความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมและความสามารถในการรับแรงดึง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองโดยการปรับอัตราความเร็วรอบและอัตราความเร็วเดินแนวเชื่อมโดยทำการจับยึดชิ้นงานและทิศทางเดินเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) และบ่าในการเชื่อมทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 มีรูปร่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางของบ่าเครื่องมือ มีขนาด 25 มม. ตัวกวนมีรูปร่างทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 มม. มีความยาวของตัวกวนหรือสลักแกนหมุน 2.8 มม. เอียง 2 องศา ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข)



รูปที่ 1 รอยต่อชนอลูมิเนียมผสม AA6063 ขนาดความหนา 6.3 mm และความหนา 3 มม.

3.1 การปรับอัตราความเร็วในการเชื่อม

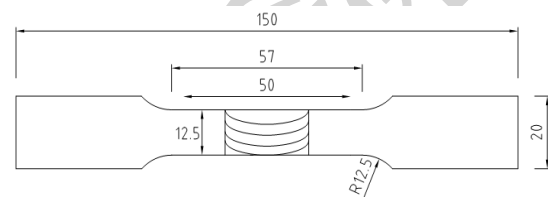
ในการทดลองนี้ใช้เครื่องกัด ยี่ห้อ AVIASOP Made in Poland รุ่น SAX 50469 โดยมีอัตราความเร็วรอบในการหมุน (Rotating Speed) ที่ 200, 500, 1000 rpm และทำการปรับอัตราความเร็วเดินเชื่อม (Welding Speed) ในการป้อน 5 ระดับ คือ 25, 50, 80, 100 และ 125 มม./นาที ในขณะที่เชื่อมกวนนั้นจะให้หัวกวนกดลงบริเวณที่กลารอยต่อชนลึก 2.5 มม. จากชิ้นงานความหนา 3 มม. ซึ่งตัวกวนจะขนานกับผิวชิ้นงานหมุนกวนเชื่อมเป็นแนวเชื่อมยาว 120 มม. ดังแสดงกระบวนการเชื่อมในรูปที่ 1

3.2 การตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม

การตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมในที่นี้จะทำการตรวจสอบด้วยตาเปล่าผิวหน้ารอยแนวเชื่อมเพื่อหาจุดบกพร่องบริเวณที่ผิวงานของแนวเชื่อม

3.3 การทดสอบความสามารถในการรับแรงดึง

การทดสอบความสามารถในการรับแรงดึงจะทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดด้วยลวดไฟฟ้า (WEDM) ตามมาตรฐาน ASTM E8M-04 (ShanmugaSundaram, Murugan, 2010) และทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) โดยใช้ความเร็วในการดึง (Speed) 2 มม./นาที และแรงในการดึง (Load) 0.509 MPa/s ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M-04 (ShanmugaSundaram, Murugan, 2010) (หน่วย: มม.)

3.4 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อม

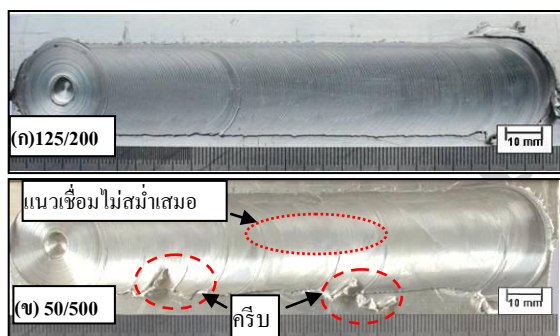
การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแนวเชื่อมจะทำการตัดชิ้นทดสอบในทิศทางตั้งฉากกับแนวเชื่อม จากนั้นนำชิ้นทดสอบมาขัดกระดาษทราย และทำการกัดกรด (Etching) ด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออริก กับ น้ำกลั่น ตามมาตรฐาน ASTM E407 แล้วส่องด้วยกล้อง Optical micro scope ยี่ห้อ LEICA รุ่น SDM2500M ที่กำลังขยาย 200 และ 400 เท่า และทำการวัดขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM E112 (นราธิป แสงชัย, 2551)

4. ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

การทดลองเชื่อมชิ้นงานอลูมิเนียมที่มีขนาดความหนาต่างกันโดยอาศัยแรงเสียดทานจากการหมุนกดหัวเชื่อมทรงกระบอกที่มีผลต่อความสมบูรณ์ของชิ้นงานและความสามารถในการรับแรงของวัสดุพบว่า

4.1 การตรวจสอบความสมบูรณ์ผิวหน้ารอยแนวเชื่อม

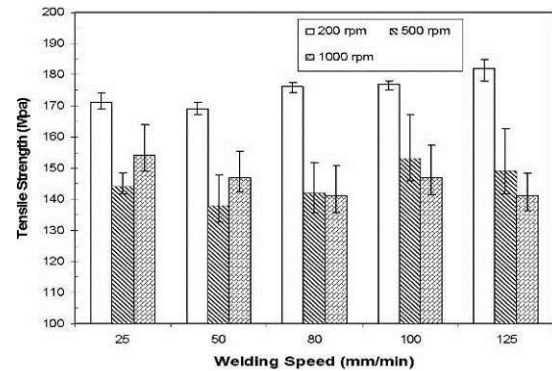
การตรวจสอบพบว่าลักษณะพื้นผิวชิ้นงานที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที่ ความเร็วรอบ 200 rpm ดังแสดงในรูปที่ 3(ก) ผิวหน้าแนวเชื่อมมีความเรียบสม่ำเสมอ นอกจากนั้นพบว่าไม่มีครีบกาวและเกิดการประสานเป็นเนื้อเดียวกันและไม่พบจุดบกพร่องบนชิ้นงานและให้ค่าความแข็งแรงดึงค่าสูงสุดและที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 มม./นาที่ ความเร็วรอบ 500 rpm เกิดผิวหน้ารอยแนวเชื่อมความเรียบไม่สม่ำเสมอ เป็นคลื่นตลอดแนวเชื่อมและมีครีบกาวเกิดขึ้นบ้างบางช่วงทางด้านรีทรีทติ้ง (Retreating Side) เส้นประสีแดง ดังแสดงในรูปที่ 3 (ข)



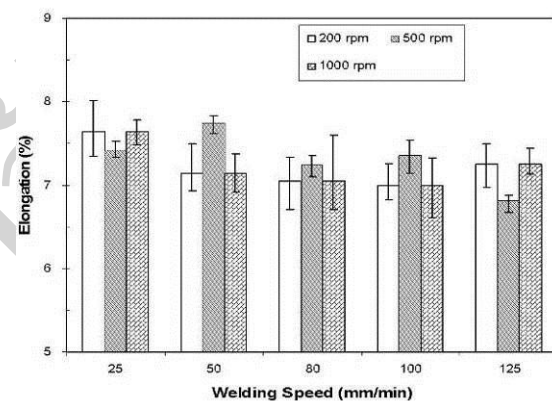
รูปที่ 3 ลักษณะผิวหน้ารอยแนวเชื่อมที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมและความเร็วรอบที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงและต่ำสุด (หน่วย : มม.)

4.2 การทดสอบความสามารถในการรับแรงดึง

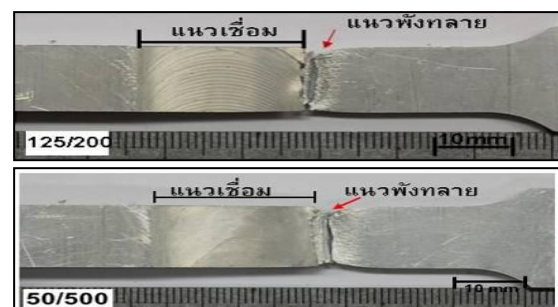
การทดสอบรับแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ค่าความแข็งแรงดึงที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 มม./นาที่ ความเร็วรอบ 200 rpm ที่เชื่อมด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกพบว่าชิ้นทดสอบมีค่าความแข็งแรงดึงค่าสูงสุดที่ 182 MPa ค่าการยืดตัว 7.25 % และที่ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 มม./นาที่ ความเร็วรอบ 500 rpm พบว่าชิ้นทดสอบมีค่าความแข็งแรงดึงน้อยกว่าที่สุดมีค่าเท่ากับ 138 MPa ค่าการยืดตัว 7.75 % ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5



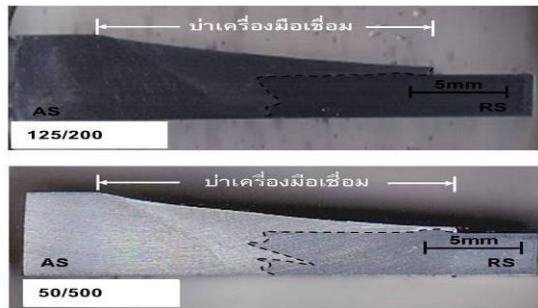
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับความเร็วเดินแนวเชื่อมและความเร็วรอบ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยืดตัวกับความเร็วเดินแนวเชื่อมและความเร็วรอบ



รูปที่ 6 ลักษณะพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงและต่ำสุด (หน่วย : มม.)



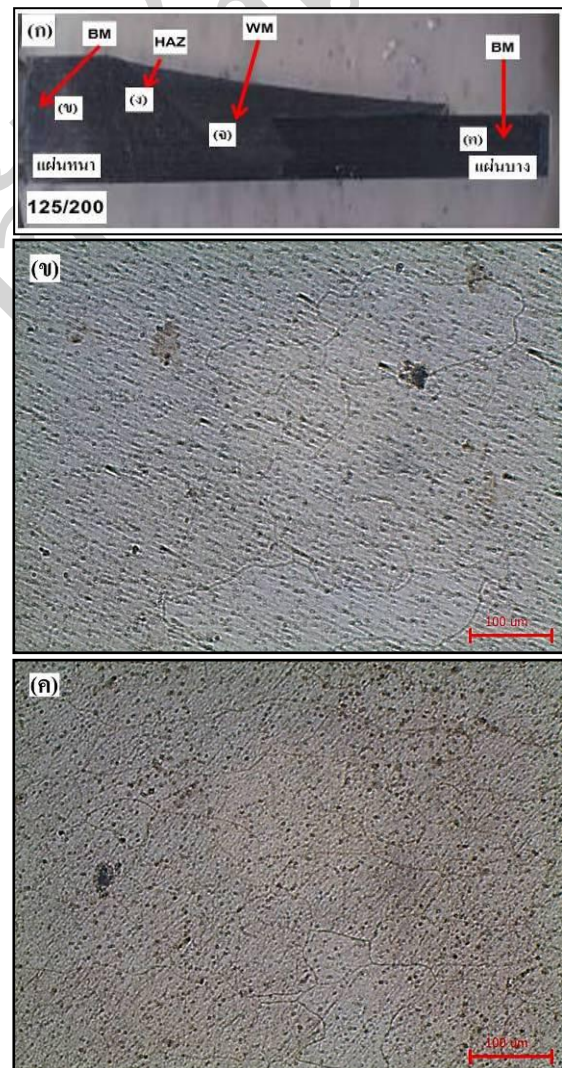
รูปที่ 7 ลักษณะโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานทดสอบที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงและต่ำสุด (หน่วย : มม.)

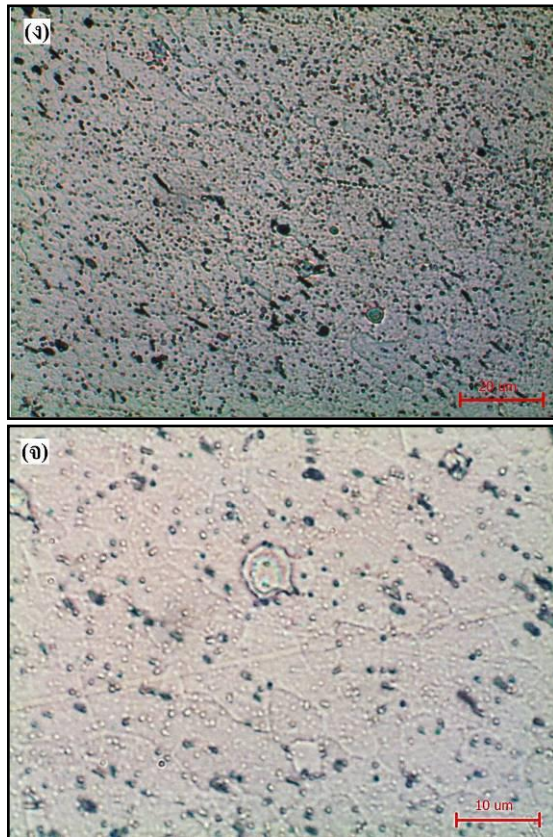
ลักษณะการฝึกขาดพบว่าชิ้นงานทั้งหมดเกิดการฝึกขาดทางด้านอูมิเนียมที่มีความหนา 3 มม. ทุกๆ ชิ้นงานทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6 และสอดคล้องกับงานวิจัยของ (ณัฐ แก้วสกุล, 2555) ได้กล่าวไว้ว่ารอยขาดเกิดขึ้นบริเวณที่ถลอกออกมาจากรอยต่อของแนวเชื่อมแสดงว่ารอยต่อประสานที่เกิดขึ้นสามารถเชื่อมประสานกันได้เป็นอย่างดี สอดคล้องกับรูปที่ 7 แสดงโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานทดสอบที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงและต่ำสุดที่มีความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม

4.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม

รูปที่ 8 (ก) โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่มีความเร็วเดินแนว 125 มม./นาที ความเร็วรอบ 200 rpm ที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงพบว่ารอยเชื่อมมีความสมบูรณ์และทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่มีความแตกต่างบนโครงสร้างมหภาคที่ตำแหน่ง (ข) ถึง (จ) ทำการวัดขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM E112 รูปที่ 8 (ข) บริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) ความหนา 6.3 มม. มีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 123.3 ไมครอน รูปที่ 8 (ค) บริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) ความหนา 3 มม. มีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 104.1 ไมครอน และพบว่ารูปร่างขนาดของเม็ดเกรนเรียงไม่เป็นระเบียบและไม่กลมมนมีความคล้ายกับงานวิจัยของ (กิตติพงษ์ กิมะ

พงษ์, 2551) และ (นราธิป แสงชัย, 2551) ดังแสดงเกรนในโลหะหลักมีรูปร่างเรียวยาวกว่าเกรนในโลหะเชื่อมมีความกลมมนรูปที่ 8 (ง) บริเวณกระแทกร้อน (HAZ) รูปร่างของเม็ดเกรนเรียงไม่เป็นระเบียบและมีลักษณะเรียวยาวมีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 21.9 ไมครอน รูปที่ 8 (จ) บริเวณแนวเชื่อม (WM) รูปร่างของเม็ดเกรนที่เป็นระเบียบและกลมมนมีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 7.75 ไมครอน





รูปที่ 8 (ก) (ข) (ค) (ง) (จ) บริเวณตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค แนวเชื่อมที่ความเร็วเดินแนว 125 มม./นาที ความเร็วรอบ 500 rpm ที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูง

5. การอภิปรายผล

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนรอยต่อชนแผ่น เทเลอร์แบลิ่งอัลูมิเนียมผสม AA6063 ผลคือ ตัวแปร อัตราความเร็วรอบของการหมุนที่แตกต่างกันส่งผลให้เกิด การกวนและผสมของวัสดุรอบๆ สลักแกนหมุนหรือตัว กวนในแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน และอัตราความเร็วรอบ การหมุนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น เพราะความร้อนเกิดจากการเสียดทาน ขณะที่ความเร็ว เดินแนวเชื่อมเกิดการเคลื่อนย้ายวัสดุจากด้านหน้าของ ตัวกวนหรือสลักแกนหมุน ไปสู่ด้านหลังทำให้เกิดแนว เชื่อมที่สมบูรณ์แตกต่างกันและเกิดค่าความแข็งแรงดึงที่ แตกต่างกันได้ด้วย

6. สรุปผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปร ความเร็วรอบการเชื่อมเสียดทานแบบกวนรอยต่อชน แผ่นเทเลอร์แบลิ่งอัลูมิเนียมผสม AA6063 โดยทำการ เปลี่ยนแปลงตัวแปรความเร็วรอบและความเร็วเดินแนว เชื่อมโดยใช้รูปแบบตัวกวนทรงกระบอกสามารถ สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและความเร็ว เดินแนวเชื่อมต่ำหรือสูงเกินไป ส่งผลต่อค่าความ แข็งแรงดึงและความเรียบของผิวหน้าของแนวเชื่อมและ การเกิดครีป
2. สภาพการเชื่อมที่ดีที่สุดของแนวเชื่อมที่ เชื่อมด้วยความเร็วรอบที่ 200 rpm และความเร็วเดินแนว เชื่อมที่ 125 มม./นาที มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดในการ ทดลองนี้ เท่ากับ 182MPa โดยผิวแนวเชื่อมมีความเรียบ สม่ำเสมอ และไม่เกิดจุดบกพร่อง
3. โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วย ตัวกวนรูปทรงกระบอกมีความสมบูรณ์ และโครงสร้าง จุลภาคบริเวณแนวเชื่อม เกิดการก่อตัวของเกรนใหม่มี ขนาดเม็ดเกรนประมาณ 7.75 ไมครอน เล็กและกลมมน กว่าโลหะเดิม

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยเทคนิคชัยนาท แผนกช่าง กลโรงงาน และ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล กรุงเทพ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่ให้ความ อนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- กิตติพงษ์ กิมะพงษ์. (2551). การเชื่อมด้วยการเสียด ทานแบบกวน: การแก้ปัญหาการต่อวัสดุที่ยาก ต่อการเชื่อมหลอมละลาย. การประชุมข่ายงาน

- วิชาการวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี 2551. ประเทศไทย, 20-22 ตุลาคม 2551: 712-716.
- ณัฐ แก้วสกุล. (2555). ศึกษาอิทธิพลรูปทรงของตัวกวนและอุณหภูมิการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่มีผลต่อสมบัติทางกลรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี 2555. เพชรบุรี, ประเทศไทย, 17-19 ตุลาคม 2555: 1183-1187.
- ธงชัย เครือผือ. (2551). อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมและรูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลในการในการเชื่อมอลูมิเนียมผสม A356 ที่หล่อโดยเทคโนโลยีหล่อทิ้งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน. การประชุมช่างงานวิชาการวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2551. ประเทศไทย, 20-22 ตุลาคม 2551: 933-939.
- ธรรมบุญ อินทรพล. (2551). อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมเลเซอร์ต่อสมบัติทางกลของรอยต่อชนแผ่นเทอลอร์แบบตึงเคเหล็กเคลือบสีกกะสีเกรด SGACD. การประชุมช่างงานวิชาการวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี 2551. สงขลา, ประเทศไทย, 8-9 พฤษภาคม 2551: 579-583.
- นราธิป แสงซ้าย. (2551). อิทธิพลรูปร่างตัวกวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อความต้านแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม AA6063-T1. การประชุมช่างงานวิชาการวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี 2551. ประเทศไทย, 20-22 ตุลาคม 2551: 718-723.
- วิชัย พุ่มจันทร์. (2552). การเชื่อมอลูมิเนียม 6063 และอลูมิเนียม 7075 โดยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน. การประชุมช่างงานวิชาการวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี 2552. ขอนแก่น, ประเทศไทย, 21-22 ตุลาคม 2552: 1039-1043.
- วิชัย พุ่มจันทร์. (2555). ผลกระทบของการเอียงเครื่องมือการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่ออุณหภูมิ 6063 และ 7075. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี 2555. เพชรบุรี, ประเทศไทย, 17-19 ตุลาคม 2555: 1183-1187.
- N. ShanmugaSundaram, N. Murugan. (2010). "Tensile behavior of dissimilar friction stir welded joints of aluminium alloys". Materials and Design. 31(2010) 4148-4193.
- Thomas, W.M. and Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., Templesmith, P. and Dawes, C.J. (1991). Friction Stir Welding. G.B. Patent Application No. 9125978.8.
- Thomas, W.M. and Nicholas, E.D. (1997). "Friction Stir Welding for the Transportation Industries". Materials and Design. 18: 269-273.